

8.1 Prüfstandsautomatisierung

Zur Gewährleistung einer reproduzierbaren Diagnoseaussage sind jeweils gleiche Versuchsbedingungen für die einzelnen Testschritte einzuhalten. Gleichzeitig ergeben sich aus den jeweiligen Testvoraussetzungen Einschränkungen für die Reihenfolge der Testsequenz. Zur Erfüllung dieser Anforderungen bei einem gleichzeitig schnellen Diagnoseablauf wird eine Software-Steuerung verwendet, die gleichzeitig die Applikation der Diagnoseverfahren und die Dokumentation übernimmt.

Die Ziele der Automatisierung sind:

- Reproduzierbare Versuchsbedingungen
- Genaue Einhaltung der Ansteuerparameter
- Schnelle Diagnosedurchführung
- Hohe Anlagensicherheit durch Vermeidung von manuellen Arbeiten am druckbeaufschlagten Prüfling

Der dynamische Betrieb des Aktuators mit elektrischer Ansteuerung und Regelung der hydraulischen Druckversorgung muß dazu automatisiert erfolgen.

Nicht automatisiert werden hingegen:

- Mechanischer Einbau der Prüflinge
- Anbringen von Lasten und temporär benötigten Sensoren
- Aufnahme visueller Merkmale
- Integration und Aktivierung von Fehlereinbauten

Für alle manuellen Arbeitsschritte werden Aufforderungen für den Bediener ausgegeben und eine Ausführungsbestätigung zur Programmfortsetzung verlangt.

Mit dem Automatisierungskonzept und dem nachfolgend beschriebenen Prüfstandsaufbau wird eine schnelle, reproduzierbare Diagnosedurchführung erreicht.

8.2 Sensorik

Die LVDT-Wegsensoren im Aktuator (MCV-LVDTs für Motor- und Ventilweg sowie Ram-LVDTs für Stellzylinderweg) werden auch zur Diagnose verwendet. Gemessen wird das Analogsignal nach den Demodulatoren der ACU.

Spulenströme werden mittels der Stromverstärker-Monitorausgänge, die über einen Koaxial-Ausgang herausgeführt sind, gemessen.

Zur Messung der Spulenspannungen wird in die Connectorbox zum Anschluß des Prüflings ein Spannungsabgriff mit Elektrometerverstärkern integriert. Die Pulsweitenmodulation der Stromverstärker liegt dabei deutlich über den Eigendynamiken im Spulensystem. Mit Anti-Aliasing Filtern und einer entsprechenden Skalierung der Verstärker kann deshalb direkt das Meßsignal erzeugt werden.

Die Referenzierung der LVDTs erfolgt jeweils mit externen Wegmessungen. Für die MCV-LVDTs am Motor- und Valve Assembly wird dazu ein analoger Tauchspulensensor mit einem Meßbereich von $\pm 2mm$ verwendet, der mit einer entsprechenden Aufnahme direkt auf die Motorachse justiert wird. Für die Ram-LVDTs mit deutlich größerem Meßbereich wird ein optischer Linearmaßstab eingesetzt, der auf dem Versuchstisch angebracht werden muß. Zur Bestimmung der Ansprechempfindlichkeit muß deshalb ein zusätzlicher Wegsensor verwendet werden, wozu der obige analoge Tauchspulensensor eingesetzt wird.

Die Kraftmessung wird mit axialen Kraftaufnehmern [HBM01] vorgenommen. Am Motor- und Valve Assembly ist wegen der Abstützung des Prüflings über die Meßstelle eine hohe Steifigkeit notwendig. Am Ram sind aufgrund des höheren Wegs die Steifigkeitsanforderungen deutlich geringer.

Im hydraulischen Teil werden Druck- und Volumenstromsensoren verwendet. Um die im Meßwert enthaltenen Leitungsdruckabfälle zu reduzieren, werden die Drucksensoren nah am Prüfling angebracht. Zur Diagnose des Valve Assembly werden die Verbraucheranschlüsse mit definierten Drosseln verbunden. Die entsprechenden Verbraucherdrücke werden mit eigenen Drucksensoren gemessen. Am Gesamtgerät wird auf die dazu notwendige Modifikation des Piping verzichtet. Drucksensoren werden deshalb nur in den Zu- und Rückleitungen angebracht.

Die für das verwendete Hydraulikfluid einsetzbaren Zahnrad-Volumenstromsensoren sind aufgrund der begrenzten Dynamik nur für quasistatische Messungen einsetzbar. In der Rückleitung werden daher zur Messung von nominalen Durchflüssen und Leckagedurchflüssen bei geschlossenem Ventil umschaltbar zwei Sensoren mit unterschiedlichen Meßbereichen verwendet. In den Verbraucherleitungen wird jeweils ein Sensor für maximalen Durchfluß eingesetzt.

Zur Messung der geringen externen Leakage ist die Anbringung eines Tropfsensors vorgesehen. Der Aufbau wird am Experimentalprüfstand jedoch nicht verwendet.

8.3 Mechanischer Aufbau

Der mechanische Aufbau des Prüfstands wird von hohen, teilweise konträren Auslegungsforderungen bestimmt:

- Konfigurierbarkeit: Der Versuchstisch soll mit mechanischen Adaptionen für alle drei Prüflinge verwendet werden können. Gleichzeitig müssen Adaptionen für die verschiedenen, Testschritt-spezifischen Konfigurationen vorgesehen und die Möglichkeit zur Integration der Fehlereinbauten vorgehalten werden.
- Präzision: Der geringe maximale Weg des Motors stellt mit $y_{max} = 0,8mm$ hohe Anforderungen an die Applikation des externen Wegsensors und an die Steifigkeit der mechanischen Aufnahmen.
- Steifigkeit: Die maximalen Kräfte am Stellzylinder mit $F_{max} = 25kN$ erfordern eine hohe Stabilität des Versuchstisches.
- Ergonomie: Der Arbeitsaufwand zum Einbau der Prüflinge und Umbau der jeweiligen Testschritt-spezifischen Konfigurationen bestimmen mit den Zeitbedarf für einen Diagnosedurchlauf und damit neben den Kosten auch die Akzeptanz beim Bediener.

Zur Abdeckung einbaulagespezifischer Fehlersymptome werden die Prüflinge entsprechend der Flugzeug-Einbaulage montiert. Die Ruderbewegung bedingt dabei eine Drehung des eye-end, die im Prüfstand mit einer Führungsstange erzeugt wird.

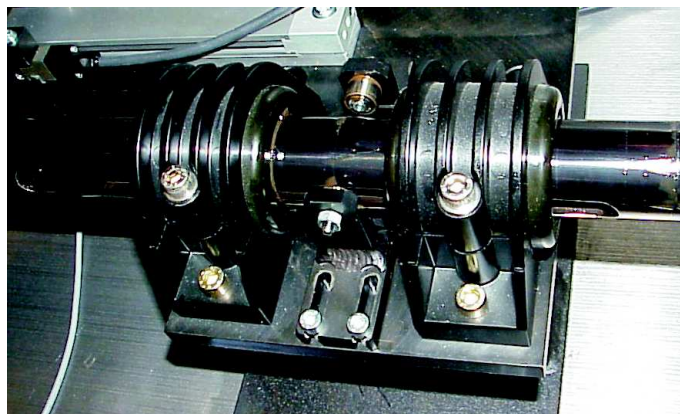


Abb. 8.3: Führung für die Drehbewegung der Kolbenstange.

Für den Motor werden Aufnahmen mit den Ram-Befestigungspunkten und der Valve-Anschlußplatte verwendet. Zur Messung der statischen Strom-Kraft Kennlinie wird der Motor blockiert und auf der freien, Valve-abgewandten Seite die Kraft mit einer Kraftmeßdose gemessen. Dazu muß die maximal mögliche Kraft von $1200N$ gegenüber dem Tisch abgestützt werden.

Die Blockierung erfolgt mit einer hydraulisch betätigten Bremse, die spielfrei gegenüber dem Tisch arbeitet. Der doppelt wirkende hydraulische Zylinder der Bremse (Ziffer 1 in Abb. 8.4)

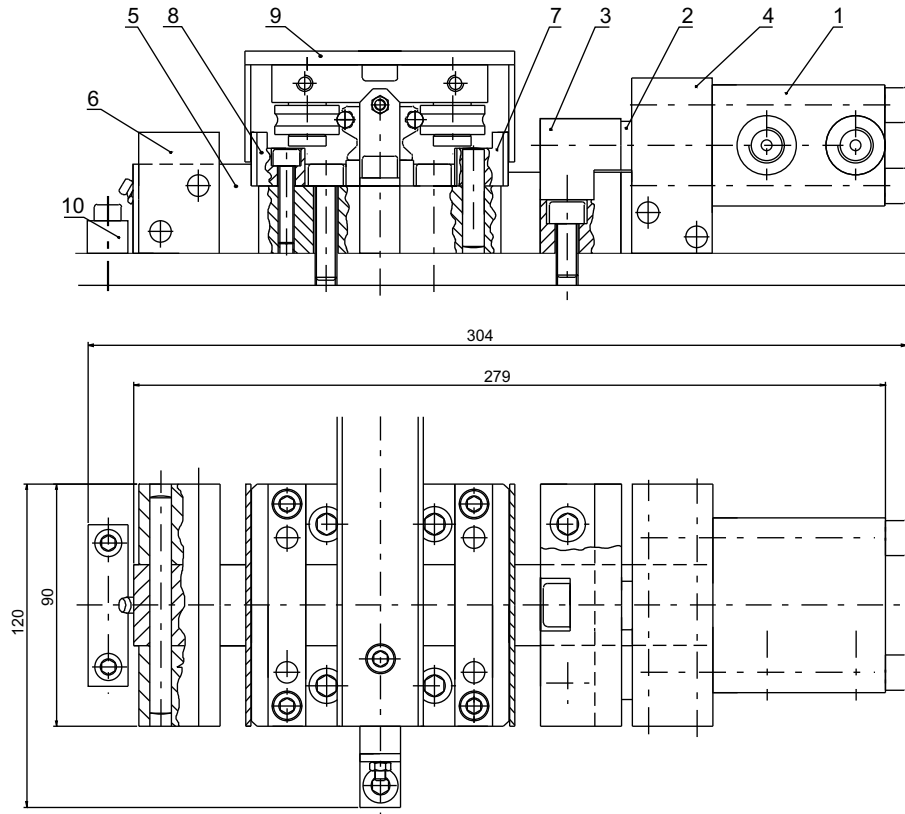


Abb. 8.4: Aufbau der hydraulischen Bremse.

wird über zwei Soleonid-Ventile betrieben. Mit dem Kolben (Ziffer 2) wird eine Bremsbacke (Ziffer 3) gegenüber der schwimmenden Lagerung (Ziffern 4 und 5) bewegt. Auf der Gegenseite ist diese mit der zweiten Bremsbacke (Ziffer 6) fest verbunden. Mit ausfahrendem Kolben werden so abgesehen von Reibung und Massenträgheit symmetrische Kräfte auf die Bleche der passiven Last (Ziffer 9) ausgeübt. Die Abstützung der Bleche wird von tischfesten Gegenbacken (Ziffern 7 und 8) gewährleistet. Damit übertragen diese die vollständige Last auf den Versuchstisch. Für die mechanisch steife Positionierung der passiven Last sind hohe Anpreßkräfte des Zylinders und eine hohe Steifigkeit der Gegenbacken gegenüber dem Tisch erforderlich. Beim Lösen der Bremse wird durch den Anschlag (Ziffer 10) eine symmetrisch geöffnete Endposition vorgegeben. Die Realisierung ist in Abb. 8.5 dargestellt.

Für die Einhaltung der Motorposition unter Last sind die Gesamtelastizität von Bremse, passiver Last und Adaption sowie das enthaltene Spiel verantwortlich. Gleichzeitig wird die Adaption verwendet, um bei dynamischer Bewegung mit einer passiven Last die wirksame Beschleunigung über die auf eine Masse wirkende Kraft F_{Last} zu messen:

$$\ddot{y} \approx \frac{F_{Last}}{m_{Last}} \quad (8.1)$$

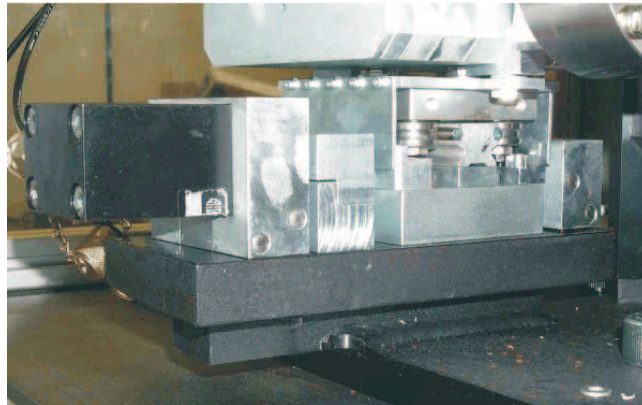


Abb. 8.5: Bremse zur Blockierung der Motor- und Ventilbewegung.

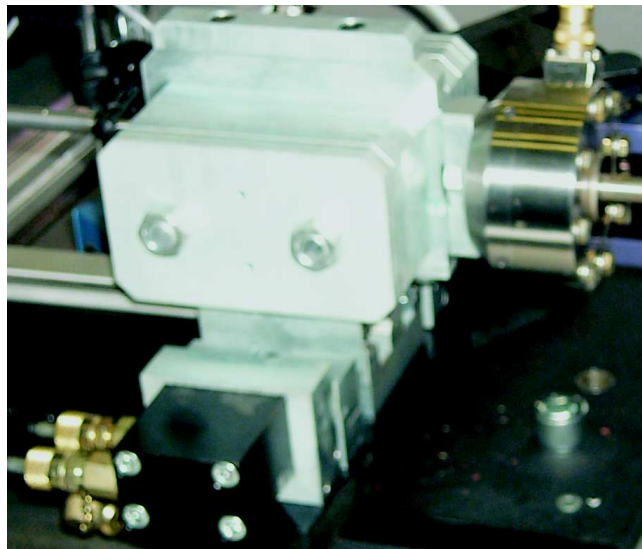


Abb. 8.6: Passive Last zur Messung der wirksamen Beschleunigung.

Die Führung der Last wird reibarm ($F_R < 1N$) mit einer Linearführung realisiert. Damit kann die passive Last mit guter Näherung als träge Masse mit bekanntem Gewicht modelliert werden.

Für das Valve Assembly können die Adaptionen des Motors übernommen werden, da diese nur an die Valve-abgewandte Seite angebracht werden. Die damit möglichen Messungen bei blockiertem Weg und dynamischer Bewegung werden so um die Funktionalität der in Abschnitt 8.4 beschriebenen hydraulischen Ansteuerungen erweitert.

Am Gesamtgerät muß zur Erkennung von Dichtungsfehlern im Ram ein Differenzdruck erzeugt werden. Bei freier Bewegung der Kolbenstange entstehen aufgrund der Drosselverluste, der begrenzten Dynamik des Ventils und der geringen beschleunigten Masse nur geringe Differenzdrücke ($\Delta p < 10bar$). Diese reichen jedoch aufgrund des zu geringen Signal-Störabstands (signal to noise) zur Anwendung der analytischen Fehlerdiagnoseverfahren nicht aus.

Die hohen Kräfte bei einer statischen Blockierung erfordern ebenfalls eine externe Masse als passive Last. Aus der dynamisch gemessenen Kraft kann gleichzeitig der Differenzdruck in den Zylinderkammern abgeleitet werden:

$$F_K = A_K(\alpha p_{A1} - p_{B1} + p_{A2} - p_{B2}) - F_{R,RA} - m_K \ddot{x}_K \quad (8.2)$$

Bei der Ein- und Ausfahrbewegung des Aktuators wird auch die durch die Einbaulage im Flugzeug erzeugte Drehung abgebildet, da die dabei entstehende Drehbeanspruchung der Dichtungen Auswirkungen auf das Auftreten von Dichtungsfehlern hat.

Neben den Dichtungsfehlern ist auch das Spiel in den Aufnahmen und den Gelenkköpfen von earth-end und eye-end einbauabhängig. Am Prüfstand kann jedoch nur das Spiel im Gelenkkopf reproduziert werden. Die Ösen werden deshalb reibschlüssig verspannt.

Der zur Referenzierung der statischen Wegmessung notwendige externe Wegsensor wird nah am eye-end angebracht. Die Drehbewegung wird über einen mit Kugelumlaufbuchsen gelagerten Ausleger realisiert.

8.4 Hydraulische Ansteuerung

Die in Abb. 8.7 gezeigte hydraulische Ansteuerung erlaubt:

- Aktivieren einzelner Systeme
- Schalten einzelner Meßgeräte (Q , p)
- Regelung des Versorgungsdrucks

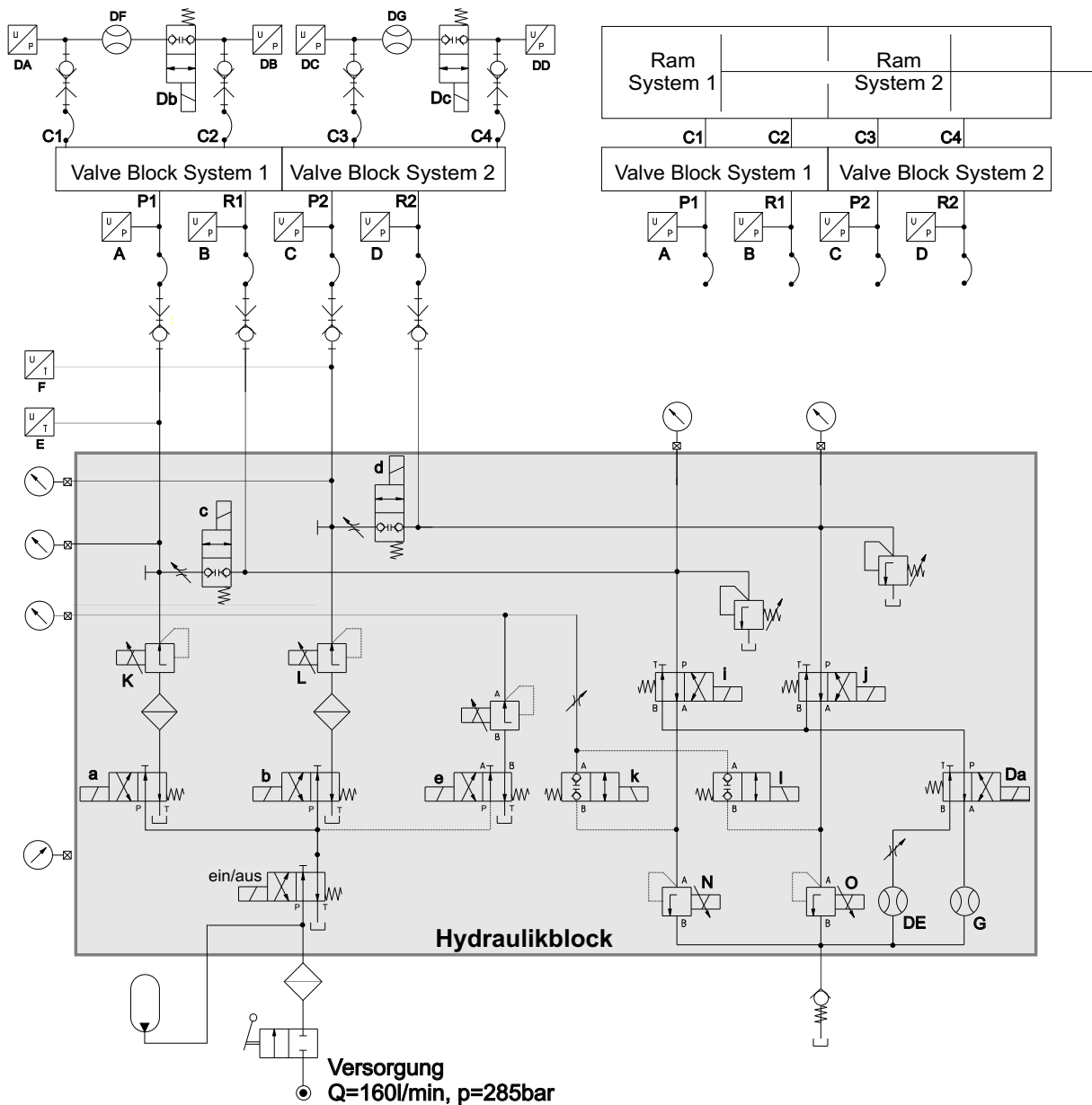


Abb. 8.7: Hydraulische Ansteuerung (schematische Darstellung).

Für die Diagnose des Valve Assembly ist als Verbraucher eine Drossel vorgesehen, die per Schaltventil (Db, Dc in Abb. 8.7) geschlossen werden kann. Alle hydraulischen Komponenten-

ten werden in einen Ansteuerschrank integriert, der vom Prüftisch mittels einer Trennwand separiert ist. Dies gewährleistet zusätzliche Arbeitssicherheit.

Zur Reduktion von Leckagen wird ein Großteil der Ventile in einen Hydraulikblock integriert (siehe Abb. 8.7 und Abb. 8.8).

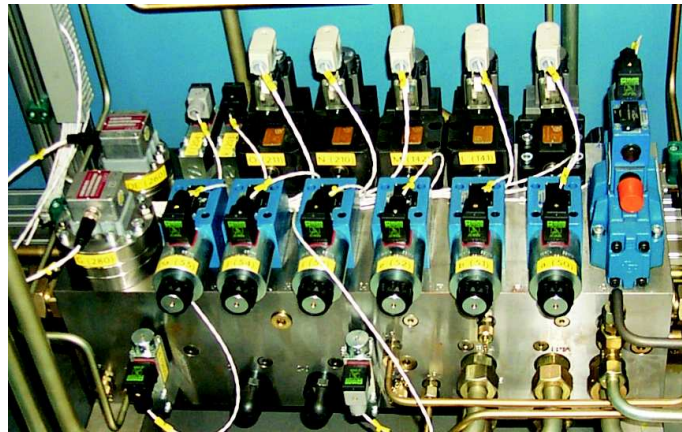


Abb. 8.8: Hydraulikblock mit Steuerventilen.

8.5 Fehlereinbauten

Die zum Nachweis der Prüfstandsfunktionalität verwendeten Golden Devices sind Fehlereinbauten mit exakt bekanntem oder on-line meßbarem quantitativen Fehlereinfluß. Die damit induzierten Fehler sollen gleichzeitig möglichst exakt den erwarteten Fehlersymptomen laut Kapitel 4 entsprechen. Die Reproduzierbarkeit von Fehlern im Prüfling setzt voraus, daß die Fehlereinbauten konsistent über den gesamten Prüfzyklus verwendet werden können. Auf Steuerungseinbauten für die Fehlerrepräsentationen wurde zur Reduktion des Ansteueraufwands verzichtet.

Mit der Verifikation der Diagnosefunktionalität wird ein Meßdatensatz erzeugt, der zur zyklischen Prüfung der Prüfstandsfunktionalität im Rahmen der Signalkalibrierungen verwendet werden kann.

8.5.1 LVDT-Fehler

Die integrierten LVDT-Sensoren sind mit einer Primär- und zwei Sekundärwicklungen sowie einem beweglichen Kern (siehe Abb. 8.9) aufgebaut. Die Primärwicklung wird mit einer Wechselspannung versorgt und ist über den Kern mit den beiden Sekundärwicklungen gekoppelt. Verschiebt man den Kern, so ändert sich die Kopplung. Schaltet man die Sekundärwicklungen zu einer induktiven Vollbrücke, so läßt sich aus der Phasenlage zwischen Anregung und Ausgangssignal mit weitgehend linearem Zusammenhang die Kernposition ermitteln.

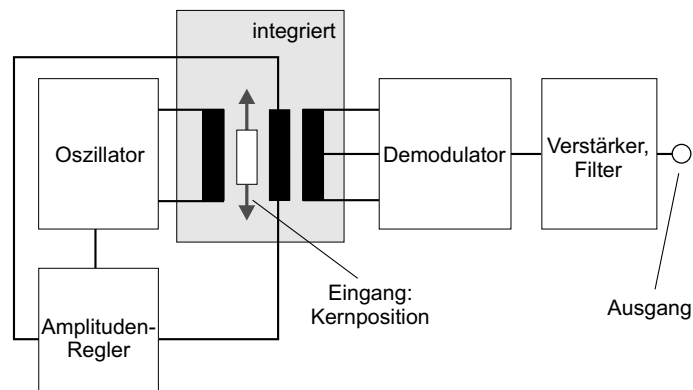


Abb. 8.9: Funktionsprinzip der LVDT-Sensoren.

Die Phasenlage wird dazu in einem Demodulator ausgewertet, verstärkt und gefiltert. Das Spulensystem ist in den Aktuator integriert und damit von der Diagnose zu überprüfen. Ansteuerung und Auswertung sind hingegen Bestandteil der ACU.

Das Spulensystem kann folgende Fehler aufweisen:

- Konstanter Offset durch mechanische Dejustage
- Verstärkungsfehler durch Änderung der Tauchspuleninduktivität
- Nichtlineare Kennlinie durch Wicklungsschluß in den Spulen

Die schaltungstechnische Realisierung der Sensorfehler ist in Abb. 8.10 dargestellt. Zur Reproduktion wird eine Operationsverstärkerschaltung im Gleichspannungssignal

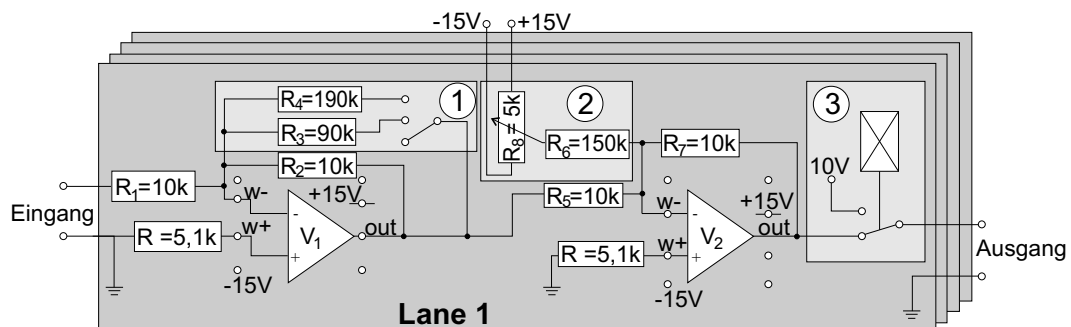


Abb. 8.10: Schaltplan zum Fehlereinbau für LVDT-Fehler.

nach Demodulation verwendet. Ein Verstärkungsfehler kann durch Umschalten der Operationsverstärker-Rückkopplung (Ziffer 1) verändert werden. Mit dem zusätzlichen, einstellbaren Gleichspannungsanteil (Ziffer 2) kann ein variabler Signal-Offset überlagert und mit dem Umschalter am Ausgang (Ziffer 3) ein fester Signalpegel für einen Totalausfall vorgegeben werden. Alle Fehler können on-line mit zusätzlichen, externen Spannungsmeßgeräten kalibriert werden.

8.5.2 Spulenfehler

Im Spulensystem des Motors sind folgende Fehler möglich:

- Widerstandserhöhung durch Übergangswiderstände
- Kabelbruch
- Induktivitätsänderung bei gleichzeitig kleinerem Widerstand durch Wicklungsschluß

Widerstandserhöhung und Kabelbruch können durch Lastwiderstände im Stromkreis der Lanes sowie durch Auftrennen der Leitungen reproduziert werden. In der breakout-box (Abb. 8.11) sind dazu Steckverbinder mit Kurzschlußbügeln vorgesehen, die zur Fehlerintegration durch Widerstände ersetzt oder entfernt (Kabelbruch) werden.

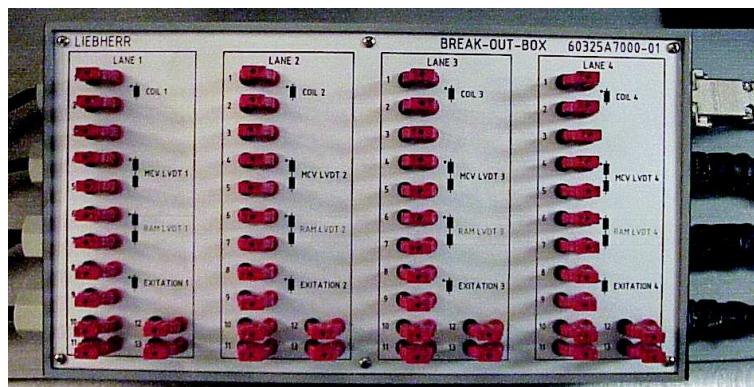


Abb. 8.11: Breakout-box zur Integration der Spulenfehler.

Zur Reproduktion von Induktivitätsänderungen muß auf modifizierte Spulen zurückgegriffen werden, die im Rahmen des Forschungsprojekts jedoch nicht zur Verfügung standen.

8.5.3 Reibung

In Anbetracht der begrenzten Motorkraft und der mechanischen Singularität im Ventil sind besonders die Motor- und Valve-Reibung kritische Fehler. Die Reibung im Stellzylinder ist weniger kritisch, da wegen der hohen hydraulischen Drücke große Kraftreserven zur Verfügung stehen. In beiden Fällen tritt aufgrund der in Abschnitt 4.4 beschriebenen Reibpaarungen Mischreibung aus Coulombscher und viskoser Reibung auf.

Zur Reproduktion des Fehlers werden mechanische Reibeinbauten verwendet. Der Betrag der Reibung läßt sich mit der Normalenkraft über eine Federweg-Verstellung variieren. Die Reibkraft wird aufgrund des analytisch nicht exakt beschreibbaren Reibungskoeffizienten jeweils mitgemessen. An Motor und Ventil wird die Reibkraft auf eine verlängerte Motorachse aufgebracht (Abb. 8.12).

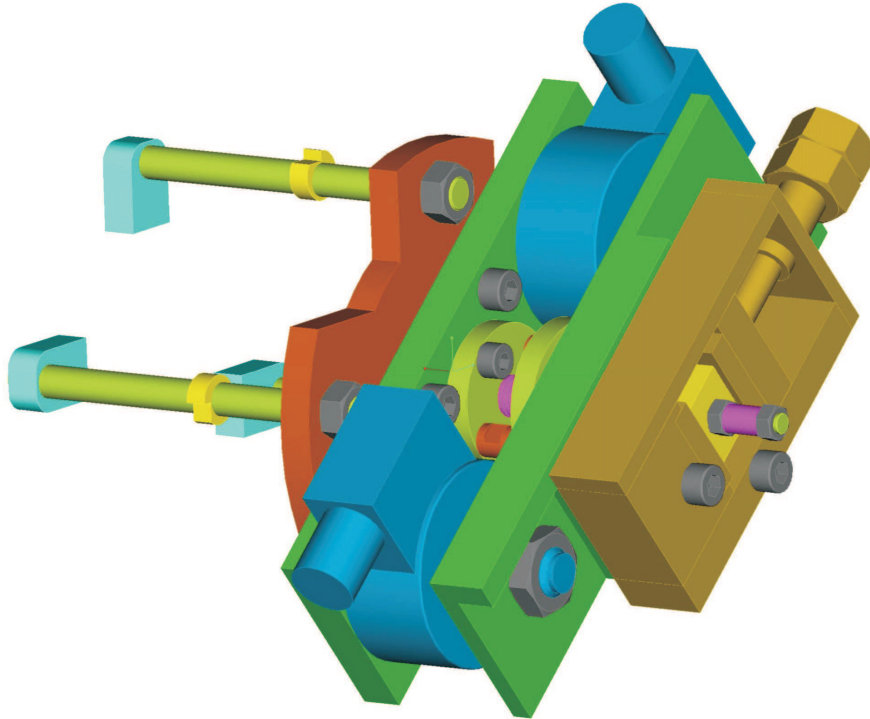


Abb. 8.12: Fehlereinbau für Reibung am Valve.

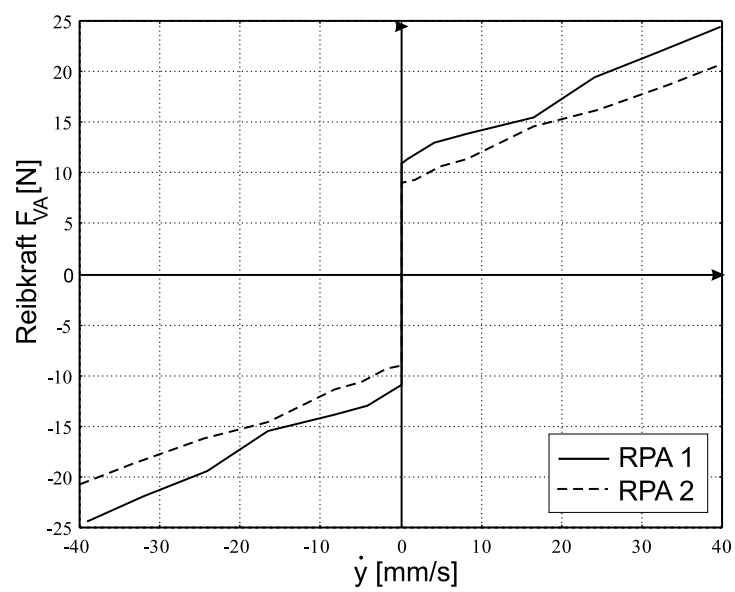


Abb. 8.13: Reibcharakteristik am Valve (Messung an zwei Prüflingen).

Die zusätzliche Masse muß im analytischen Modell der Bewegungsgleichung jeweils berücksichtigt werden. Für Motor und Ventil wird eine Reibpaarung aus Stahl und PTFE eingesetzt, die eine Reibcharakteristik laut Abb. 8.13 (Messung an zwei Prüflingen) aufweist.

Für die Reibung am Ram wird aufgrund der höheren Kräfte laut Abb. 8.15 ein elastomer-/kunstharzgebundener Industrie-Reibbelag [Ray01] verwendet. Der Fehlereinbau in Abb. 8.14 wird auf die verlängerte Achse des Stellzylinders hinter der passiven Last angebracht. Die zusätzliche Masse des Fehlereinbaus kann hier durch Demontage einer abgestimmten Platte der passiven Last kompensiert werden.

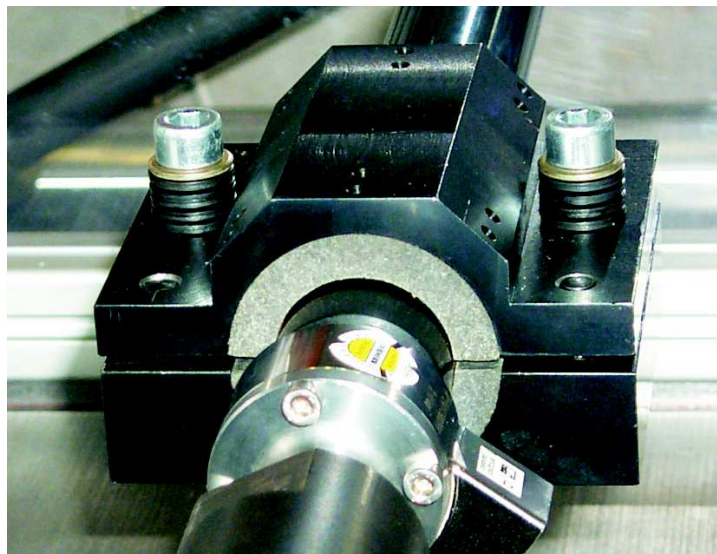


Abb. 8.14: Fehlereinbau für Reibung am Ram.

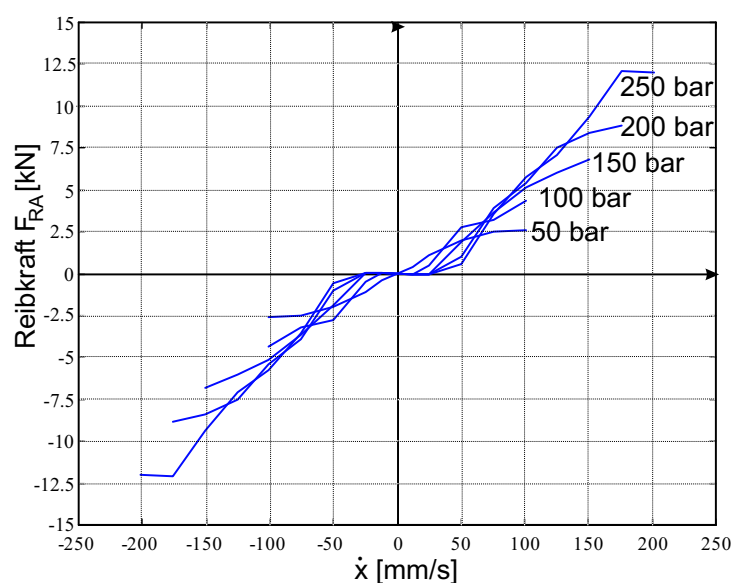


Abb. 8.15: Reibcharakteristik am Ram.

8.5.4 Leckagen

Zur Reproduktion der möglichen Leckströme wurden folgende Fehlereinbauten ausgewählt:

- Interne Leckage
- Steuerkantenleckage
- Inter-System Leckage

Die internen Leckagen und die Inter-System Leckage sind dabei wegen der geringen Volumenströme laut Abschnitt 4.1 mit laminarer Strömungscharakteristik anzunehmen. Die Leckagen an den Steuerkanten des Ventils sind turbulent.

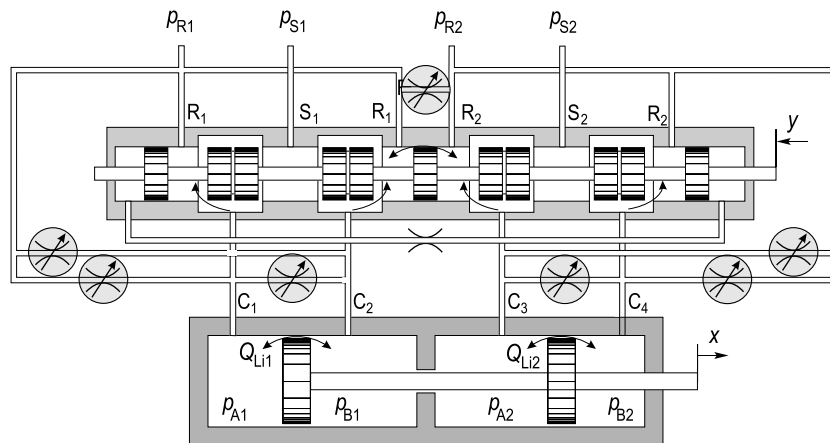


Abb. 8.16: Fehlereinbauten zur Reproduktion von Leckagen.

$R_1 \leftrightarrow R_2$	Inter-System Leckage Ventil	laminar
$C_1 \leftrightarrow C_2$	Interne Leckage Zylinder 1	laminar
$C_3 \leftrightarrow C_4$	Interne Leckage Zylinder 2	laminar
$C_1 \leftrightarrow R_1$	Steuerkanten-Leckage Ventil	turbulent
$C_2 \leftrightarrow R_1$	Steuerkanten-Leckage Ventil	turbulent
$C_3 \leftrightarrow R_2$	Steuerkanten-Leckage Ventil	turbulent
$C_4 \leftrightarrow R_2$	Steuerkanten-Leckage Ventil	turbulent

Tabelle 8.1: Liste der Leckage-Fehlereinbauten.

Zur Reproduktion der Fehler wurden laminare Spaltdrosseln zwischen den entsprechenden Stellen in die Verrohrung eingebracht.

8.5.5 Dejustage

Durch die geometrische Anordnung im Motor und die geschraubte Achse zwischen Motor und Ventil sind zwei mechanische Dejustagen möglich:

- Verschobener mechanischer Nullpunkt: Der durch die Federn und die Permanentmagnete bestimmte Kraftnullpunkt des Motorankers gegenüber dem Gehäuse ist durch einseitig veränderte Federn oder Magnete verschoben. Der Fehler wird mit einer vorgespannten äußeren Feder reproduziert.
- Verschobener hydraulischer Nullpunkt: Mit der schraubbaren Welle zwischen Motor und Ventil läßt sich der hydraulische Nullpunkt ohne zusätzliche Vorrichtung gegenüber dem mechanischen Nullpunkt verschieben.

8.5.6 Relaxierte Zentrierfeder

Eine Relaxation der Motorzentrierfedern durch Überbeanspruchung verringert die wirksame Federsteifigkeit. Bei symmetrischer Relaxation der beiden Zentrierfedern bleibt der mechanische Nullpunkt des Motors jedoch gleich. Als Fehlereinbau kann zusätzlich eine äußere Feder zur Erhöhung der wirksamen Federsteifigkeit verwendet werden. Über die quantitative Fehleraussage läßt sich damit im Umkehrschluß auch eine verringerte Federkraft qualifizieren. Der Fehlereinbau laut Abb. 8.17 wird in die Wellenverlängerung des Fehlereinbaus Reibung integriert. Zwischen den beiden Scheiben (Ziffer 2) werden Säulenfedern (Ziffer 1) mit Kontermuttern spielfrei verspannt. Über die eingestellte Position kann zusätzlich eine Vorspannung zur Verschiebung des Nullpunkts (bezogen auf das Joch) aufgebracht werden.

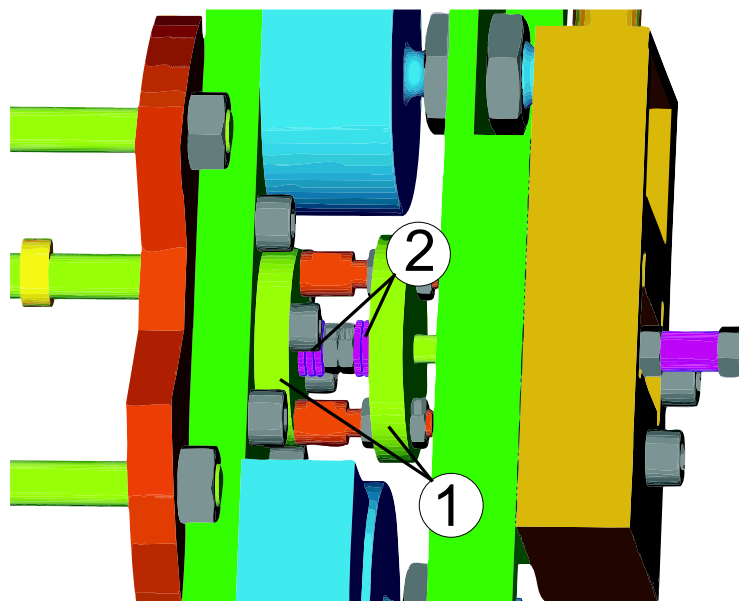


Abb. 8.17: Fehlereinbau zu relaxierten Motorfedern.

9 Implementation des Diagnoseablaufs

Die Diagnose am Prüfstand kombiniert mit dem in Kapitel 7 beschriebenen Verfahren die Ergebnisse der analytischen Diagnosemethoden und zusätzlicher Tests. Dazu muß der Ablauf nach Programm- oder Bedienvorgaben gesteuert und die Einzelergebnisse der Testschritte (Test Steps) zu einem Gesamtergebnis klassifiziert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wurde auf die on-line Implementation der Diagnoseverfahren verzichtet und die Diagnose nach Meßwertaufnahme off-line rekursiv durchgeführt. Damit lassen sich die wesentlichen Aufgaben des Diagnoseprogramms in zeitkritische und zeitunkritische Programmteile gliedern:

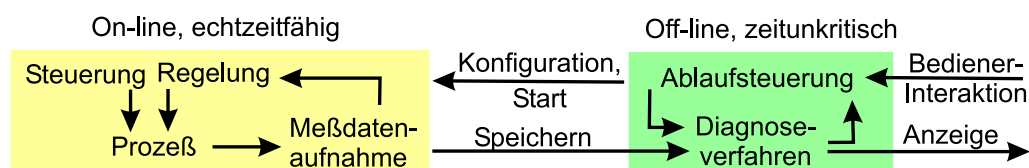


Abb. 9.1: Funktionale Aufteilung der Programmteile.

Ein PC-basiertes Rechnersystem führt die Ablaufsteuerung für den Gesamtablauf off-line durch.

Sowohl die Prozeßanbindung mit Steuerung oder Regelung des Prüflings als auch die Meßwertaufnahme wird von einem echtzeitfähigen Signalprozessor-System durchgeführt. Das System wird dabei von der Ablaufsteuerung jeweils neu konfiguriert und gestartet. Die Meßergebnisse werden in einem lokalen Speicher abgelegt und nach Beendigung der Meßsequenz zur off-line Auswertung übergeben.

Der Bediener kann nur auf das off-line System direkt zugreifen.

9.1 Vorstellung des Diagnoseablaufs

Die Testsequenz für alle Prüflinge besteht sowohl aus direkten Tests mit Auswertung quasi-statischer Kennlinien als auch aus dynamischen Testsequenzen mit Anwendung der beschriebenen analytischen Diagnoseverfahren. Im automatisch durchgeführten Diagnoseablauf wird für die einzelnen Testschritte die jeweilige Ansteuerungs- und Betriebskonfiguration des Prüflings sowie die Vorparametrierung aus vorausgegangenen Schritten bereitgestellt.

Für jeden Testzyklus muß von einem defekten Prüfling ausgegangen werden. Vor den dynamischen Testschritten, die einen Betrieb des Prüflings erfordern, muß daher zunächst eine Prüfung auf Betriebsfähigkeit stattfinden. Ist eine Bewegung des Aktuators nicht möglich, so wird die Diagnose abgebrochen.

In den weiteren Testschritten wird das Wissen über den Prüfling sukzessive aufgebaut:

- Parameter: Zu den bereits vorher bekannten Werten werden die mit einer geänderten Betriebskonfiguration zusätzlich identifizierten Parameter ergänzt.
- Symptome: Die im jeweiligen Testschritt aus den Merkmalen generierten Symptome werden zur Symptommenge hinzugefügt.
- Ergebnisse: Die aktuell aus dem Testschritt mit vorhandenem Vorwissen ableitbaren Teilergebnisse werden jeweils dargestellt.

Damit ergibt sich der in Abb. 9.2 dargestellte, modulare Diagnoseablauf.

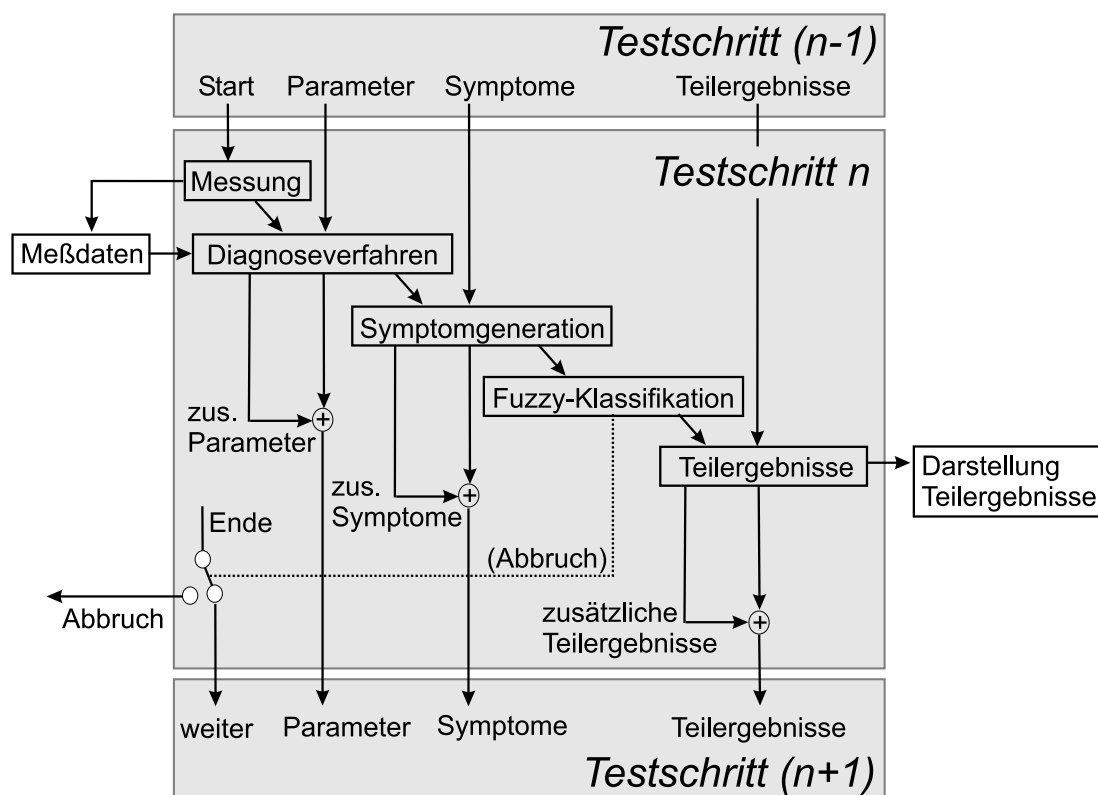


Abb. 9.2: Darstellung des Diagnoseablaufs.

9.2 Softwarestruktur

Die zeitunkritischen Programmteile wurden als MATLAB Skriptfile programmiert, wodurch gleichzeitig eine einfache Kommunikation mit den Echtzeit-Programmen gewährleistet werden konnte.

Interaktion und Ergebnisdarstellung erfolgen über eine grafische Oberfläche (Graphical User Interface, GUI), die eine einfache Führung durch das Programm und eine hohe Darstellungstiefe miteinander verbindet.

Für die einzelnen Testschritte werden auf der Oberfläche die Bedienerinteraktionen abgefragt, die Durchführung gestartet und die Ergebnisse dargestellt. Der prinzipielle Ablauf ist in Abb. 9.3 dargestellt.

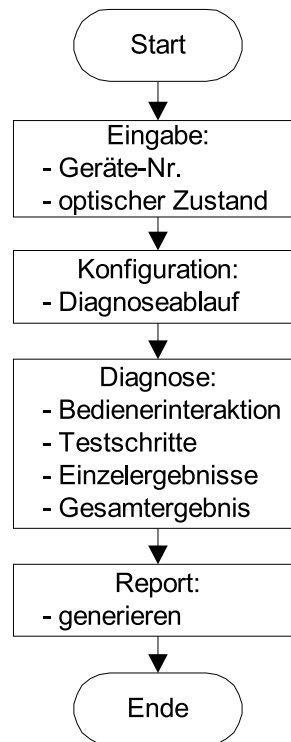


Abb. 9.3: Software-Module für den Diagnoseablauf.

Zu Beginn des Diagnoseablaufs werden im *Eingabemodul* die Referenzen für Prüfling und Prüfung sowie visuelle Symptome (*Visual Inspection*) abgefragt:

- Geräte-Nr. des Prüflings
- Identifikation des Prüfvorgangs (Datum, Prüfer)
- visueller Zustand

Im nächsten Schritt wird im *Konfigurationsmodul* der Umfang des Diagnoseablaufs durch Auswahl der einzelnen Testschritte festgelegt. Vor dem Start der Sequenz kann der Bediener die notwendigen Testschritte in einer Konfigurationsmaske gemäß Abb. 9.4 selektieren.

Da die Serienabnahme den Prüfling qualifiziert, ist in diesem Modus die Durchführung aller Testschritte zwingend vorgeschrieben. Im Rahmen der Wartungsdiagnose kann der Umfang auf einen anhand der Fehlerindikation ausgewählten Analyseschwerpunkt beschränkt werden, wobei die notwendigen Sensorinitialisierungen und Justagen immer ausgeführt werden müssen. Im Wartungsablauf wird zudem davon ausgegangen, daß keine gültigen Teilergebnisse vorliegen, die geladen werden könnten.



Abb. 9.4: Konfiguration Diagnoseablauf Valve Assembly.

Die Diagnosemodule beinhalten die Durchführung und Auswertung der Testschritte. Die gemeinsame grafische Oberfläche mit durchgängiger Anzeigephilosophie ist unterteilt in:

- Statusanzeige Diagnoseschritte
- Statusanzeige Prüfstand
- Interaktion Programmablauf
- Grafische Ergebnisanzeige
- Alphanumerische Ergebnisanzeige

In Verbindung mit den eingesetzten dSPACE-Prozeßrechnern [dG99] wurden für die Echtzeit-Programmenteile die Programmerstellung unter SIMULINK (siehe Abb. 9.5) durchgeführt, woraus mit einem Autocode-Tool über den Zwischenschritt C-Code ein auf der Zielplattform lauffähiger Code erzeugt wurde (siehe Abb. 9.6).

Im *Diagnosemodul* werden alle Teilergebnisse gespeichert und mit dem konsolidierten Gesamtergebnis unter dem referenzierten Verzeichnis abgelegt.

Innerhalb des *Reportmoduls* wird aus vordefinierten Textblöcken und den gespeicherten Ergebnissen (Grafiken und Parameter) automatisch ein Prüfbericht (Test Report) generiert.

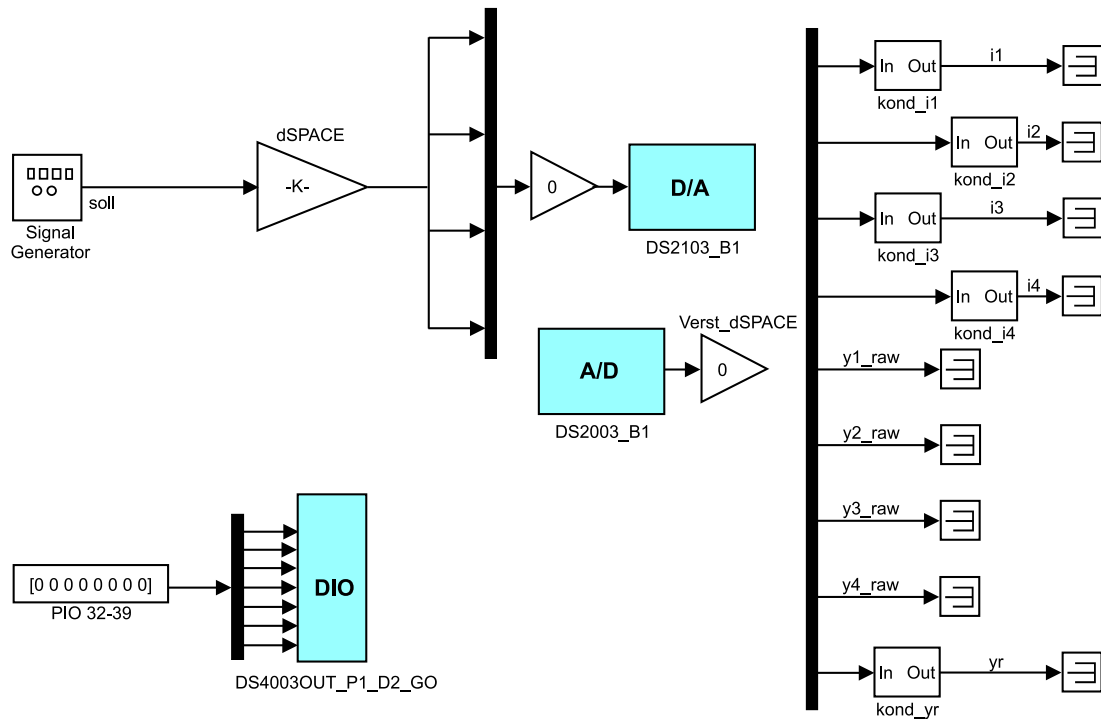


Abb. 9.5: Beispiel einer SIMULINK-Blockdarstellung.

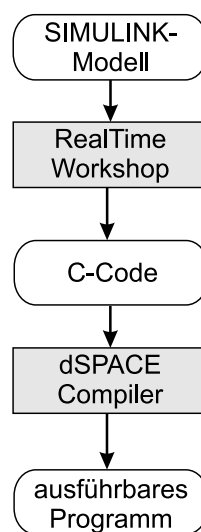


Abb. 9.6: Ablauf zur Erzeugung eines in Echtzeit ausführbaren Programms.

9.3 Diagnoseablauf Motor Assembly

Am Motor werden die Parameter der elektromechanischen Kraftherzeugung und die MCV-LVDTs diagnostiziert.

MATS		y_ext	y_int	adapt
	Visual Inspection	n	e	n
mech. Einbau des MA in Testrig				
Einbau des externen Wegsensors				
1	MCV-LVDT Tests	x	ref1	n
2	Current Stroke Characteristic	x	ref2	n
Ausbau des externen Wegsensors				
3	Stroke Response	e	x	n
Adaption anbauen				
4	Force Generation	e	x	x
5	Dynamic Tests	e	x	x
Adaption abbauen				
mech. Ausbau des MA aus Testrig				
6	Final Check and Documentation	n	n	n
Nomenklatur :				
	egal	e		
	notwendig	x		
	darf nicht	n		

Abb. 9.7: Diagnoseablauf Motor Assembly (Motor Assembly Test Steps, MATS).

Vor Betrieb des Motors muß sichergestellt werden, daß der Anker stromlos (elektrische Nullposition) mittig im Joch positioniert ist. Dazu wird über einen geringen Hub die Symmetrie der Strom-Hub-Kennlinie überprüft und die internen Sensoren gegenüber dem externen Referenzsensor vorkaliert (*MCV-LVDT Test*).

Danach wird eine vollständige Strom-Hub-Kennlinie aufgenommen. Der Strom wird als langsamer Sinus $i_e(t) = \sin(\omega t)$ deutlich unterhalb der Motordynamik vorgegeben.

$$\omega \ll \frac{2\pi}{T_{MA}} \quad (9.1)$$

Der zum Strom korrespondierende Weg entspricht damit seinem statischen Endwert. Aus der Messung kann somit die Weghysterese ermittelt und gleichzeitig die MCV-LVDTs gegenüber dem externen Referenz-Wegsensor kalibriert werden.

Zur konventionellen Bestimmung der Motor-Zeitkonstanten werden Sprungantworten mit $i_e = \sigma(t)$ (*Current Stroke Characteristic*) ermittelt. Die Zeitkonstanten sind aufgrund des nichtlinearen Prozeßmodells abhängig von dem Endwert. Damit können nur vergleichende Betrachtungen zu identischen Messungen an einem fehlerfreien Motor durchgeführt werden. Zur Schätzung der Prozeßparameter wird aus diesem Grund zusätzlich eine dynamische Strom-Anregung laut Abschnitt 5.3 verwendet.

Mit der Adaption kann der Motor dann an verschiedenen Positionen blockiert und das Strom-Kraft-Kennfeld aufgenommen werden (*Force Generation*).

Die Parameter des Kraftaufbaus sind die Grundlage für die Parameteridentifikation des Bewegungsverhaltens. Dazu können dynamische Messungen aus dem Testschritt Stroke Response und Messungen aus weiteren Tests mit passiver Last (*Dynamic Tests*) verwendet werden.

9.4 Diagnoseablauf Valve Assembly

Das Valve Assembly besteht aus dem Motor mit montiertem Ventilschieber (Valve Block). In eine Serienabnahme können die elektrischen Parameter aus dem Diagnoseergebnis des Motor Assembly übernommen werden. Für eine Diagnose ohne vorherige Motordiagnose können die Ergebnisse mit den fakultativen Motortestschritten auch neu ermittelt werden.

VATS		y_ext	y_int	hydr	adapt
	Visual Inspection	n	e	n	n
mech. Einbau des VA in Testrig					
Einbau des externen Wegsensors					
1	MCV-LVDT Tests	x	ref1	n	n
2	Running In / Venting	e	x(1)	x	e
3	Bypass Valve Function Test	e	x(1)	x	e
4	Check of Spool Valve Adjustment	e	x(1)	x	e
Ausbau des externen Wegsensors					
	Spool Valve Adjustment	n	e	x	n
Einbau des externen Wegsensors					
5	Current Stroke Characteristic	x	ref2	n	n
Ausbau des externen Wegsensors					
6	Stroke Response	e	x	n	n
7	Hydraulic Tests	e	x	x	n
8	Internal Leakage	e	x	x	e
Adaption anbauen					
9	Force Generation	e	x	n	x
10	Bernoulli Forces	e	x	x	x
11	Dynamic Tests	e	x	x	x
Adaption abbauen					
mech. Ausbau des VA aus Testrig					
12	Final Check and Documentation	n	n	n	n

Abb. 9.8: Diagnoseablauf Valve Assembly (Valve Assembly Test Steps, VATS).

Die Diagnose für den hydraulischen Teil muß in allen Fällen neu durchgeführt werden.

Nach der Montage des Prüflings in den Prüfstand ist ein Betrieb des Aktuators (*Running In/Venting*) notwendig, um das Ventil zu entlüften und reproduzierbare Eigenschaften für das Dichtungssystem herzustellen (Vermeidung von Kleben).

Eine weitere Voraussetzung für eine zielführende Diagnose ist ein richtig eingestellter hydraulischer Nullpunkt. Vor Beginn der Diagnoseschritte wird dieser deshalb überprüft (*Check of Spool Valve Adjustment*) und im Fall einer falschen Einstellung (Serienabnahme ohne vorherige Einstellung oder falsche Einstellung im Rahmen einer Wartungsdiagnose) mit dem elektrischen Nullpunkt des Motors abgeglichen (*Spool Valve Adjustment*).

Wegen der mechanischen Anschläge im Valve und den veränderten Parametern der Bewegung (Masse, Reibung, Dämpfung) müssen zur Qualifizierung die Testschritte *Current Stroke Characteristic* und *Stroke Response* für den mechanischen Teil neu durchgeführt werden.

Zur Referenzierung der mit dem Kunden abgestimmten Leistungsdaten werden in *Hydraulic Tests* Kenngrößen des hydraulischen Teils aufgenommen:

- Maximaler Durchfluß
- Druckverstärkung
- Nulldurchfluß (Quiescent Flow)
- Durchflußverstärkung
- Kraftkonflikt (Force Fight)

Als mögliche Leckage-Fehler wurden in Abschnitt 4.1 vorgestellt:

- innerhalb eines Systems zwischen Vor- und Rücklauf (internal leakage)
- zwischen den beiden Hydrauliksystemen (inter-system leakage)
- vom Ventil nach außen (external leakage)

Die äußere Leckage und die Leckage zwischen den Systemen können nur mit einem extern angebrachten Tropfsensor bestimmt werden, auf dessen Anbringung aus Kostengründen verzichtet wurde. Stattdessen werden diese Fehler im Testschritt *Final Check and Documentation* als visuelle Symptome abgefragt. Diese haben aber den Nachteil einer deutlich höheren Meßtoleranz. Die interne Leckage der beiden Systeme kann mit dem Durchfluß-Meßgerät im Rücklauf direkt gemessen werden; dies wird im Testschritt *Internal Leakage* durchgeführt.

Die Krafterzeugung in *Force Generation* ist bis auf die veränderte Krafthysterese identisch mit dem entsprechenden Testschritt für das Motor Assembly. Bereits vorliegende Ergebnisse können hier übernommen werden.

Die bei Umströmung der Steuerkanten entstehenden Strömungskräfte werden im Testschritt *Bernoulli Forces* als Kennfeld über die Portöffnung und den Druckabfall aufgenommen.

Zur Diagnose des Gesamtsystems werden in *Dynamic Tests* analog zum Motor die Fehlerdiagnoseverfahren auf die Bewegungsdynamik mit passiver Last angewendet.

9.5 Diagnoseablauf Actuator Assembly

Die Montage von Valve Assembly, Ram Assembly und Piping zum Gesamtaktuator verändert die Parameter des Valve nicht.

In einer Serienabnahme kann deshalb vollständig der Datensatz aus dem Diagnoseablauf Valve Assembly verwendet werden. Für eine Wartungsdiagnose liegen diese Daten jedoch nicht vor und müssen vollständig neu erstellt werden.

Am Ventil sind die Stellzylinder-Anschlüsse fest verrohrt und deshalb für hydraulische Messungen nicht mehr zugänglich. Die hydraulischen Tests (*Hydraulic Tests, Bernoulli Forces*) können somit nicht durchgeführt werden und die für das Bewegungsverhalten des Ventilschiebers wichtigen Strömungskräfte müssen laut Abschnitt 3.18 mit der dynamischen Bewegung des Ventilschiebers geschätzt werden.

Am Stellzylinder sind für eine Diagnoseaussage die Parameter der Ram-LVDTs, die Reibung und die Leckagebeiwerte relevant. Die Ram-LVDTs werden dabei analog zu den MCV-LVDTs gegenüber einem externen Referenzsensor vermessen. Reibung und Leckagebeiwerte werden über das Bewegungsverhalten mit passiver Last geschätzt. Daraus ergibt sich folgender Diagnoseablauf:

RATS		y extern	y intern	x extern	x intern	hydr	valve adapt
	Visual Inspection	n	e	n	e	n	n
mech. Einbau des RA in Testrig							
Einbau des externen Wegsensors							
1	MCV-LVDT Tests	x	yref1	e	e	n	n
2	Running In / Venting	e	y(1)	e	e	x	e
3	Ram-LVDT Tests	e	y(1)	x	xref1	x	e
4	Bypass Valve Function Test	e	y(1)	e	e	x	e
5	Check of Spool Valve Adjustment	e	y(1)	e	x(1)	x	e
Ausbau des externen Wegsensors							
	Spool Valve Adjustment	n	e	e	x(1)	x	n
Einbau des externen Wegsensors							
5	Current Stroke Characteristic	x	yref2	e	e	n	n
Ausbau des externen Wegsensors							
6	Stroke Response	e	x	e	e	n	n
7	Ram Stroke Characteristic	e	x	x	xref2	x	n
8	Inter-System Leakage	e	x	e	x	x	e
Adaption anbauen							
9	Force Generation	e	x	e	x	n	x
10	Dynamic Tests	e	x	e	x	x	x
Adaption abbauen							
mech. Ausbau des RA aus Testrig							
11	Final Check and Documentation	n	n			n	n

Abb. 9.9: Diagnoseablauf Kompletgerät (Rudder Actuator Test Steps, RATS).

10 Ergebnisse

Mit dem Prüfstand wird eine Serienabnahme mit einem intakten Aktuator und eine Wartungsdiagnose mit selektiv aktivierten Fehlereinbauten durchgeführt. Die im folgenden dargestellten Ergebnisse belegen die volle Funktionalität und Serientauglichkeit. Die Ergebnisse werden exemplarisch anhand einer Serienabnahme für ein intaktes Valve Assembly und charakteristischen Testschritten aus Wartungsdiagnosen mit aktiven Fehlereinbauten gezeigt.

10.1 Serienabnahme eines intakten Ventils

Eine Serienabnahme beginnt mit der Abfrage von Gerätedaten und Symptomen der visuellen Prüfung. Bei einem intakten Aktuator trägt der Bediener hier keine Fehlersymptome ein.

Als zweiter Testschritt erfolgt die Prüfung der MCV-LVDTs. Aufgrund des geringen Motor-Verfahrwegs können hiermit auch die translatorische Beweglichkeit, eine Relaxation der Zentrierfedern und gegebenenfalls die Asymmetrie der mechanischen Anschläge geprüft werden. Dazu werden einzelne Stromwerte als Sprungfunktion mit einer quasistatischen Haltedauer von $t = 2s$ vorgegeben. Aus den Meßpunkten des Wegs werden die Signalspannungswerte der LVDT-Sensoren gegenüber dem kalibrierten externen Wegsensor aufgetragen und mit einer LS-Ausgleichsgeraden die Skalierungsfaktoren bestimmt. Mit den skalierten LVDT-Signalen

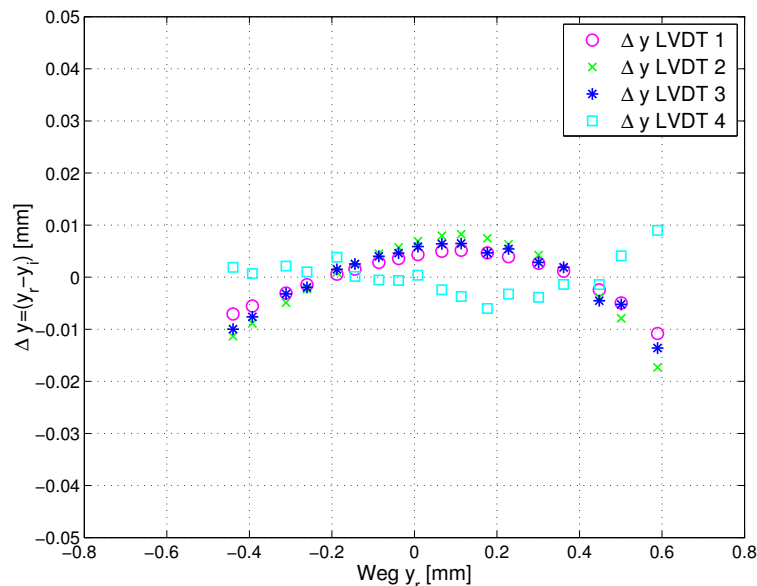


Abb. 10.1: LVDT-Meßwerte aus Testschritt *MCV-LVDT Tests*.

ergibt sich die in Abb. 10.1 dargestellte Meßwertverteilung. Im fehlerfreien Fall ergibt sich ein Verfahrweg von $|y| > 0,4mm$ in beide Richtungen und eine LVDT-Abweichung von $|\Delta y| < 0,02mm$. Bei einem zu kleinen Verfahrweg $|y| < 0,3mm$ in eine Richtung wird der Prüfablauf abgebrochen, da hier keine ausreichende Ansteuerung für die noch folgenden

Testschritte möglich ist. Aus den LVDT-Werten werden hingegen keine fehlerindizierenden Merkmale abgeleitet.

Im nachfolgenden Testschritt *Running In/Venting* werden keine Ergebnisse dargestellt, sondern es wird lediglich die Zustandsanzeige für die erfolgte Entlüftung des Hydrauliksystems gesetzt. Zur Durchführung müssen die Entlüfter (bleeder screws) beider Systeme geöffnet und das Hydrauliksystem so lange entlüftet werden, bis keine Blasen mehr festgestellt werden können. Wird der Vorgang jeweils innerhalb einer Maximalzeit von $t = 3\text{min}$ nicht abgeschlossen, so wird die Diagnose aufgrund von Fehlern in der Hydraulikversorgung abgebrochen.

Im *Bypass-Test* wird die Bypass-Durchflußkennlinie in Abhängigkeit von der Druckansteuerung $\Delta p = p_S - p_R$ ausgewertet. Aus den ermittelten Schnittpunkten p_o und p_c wird

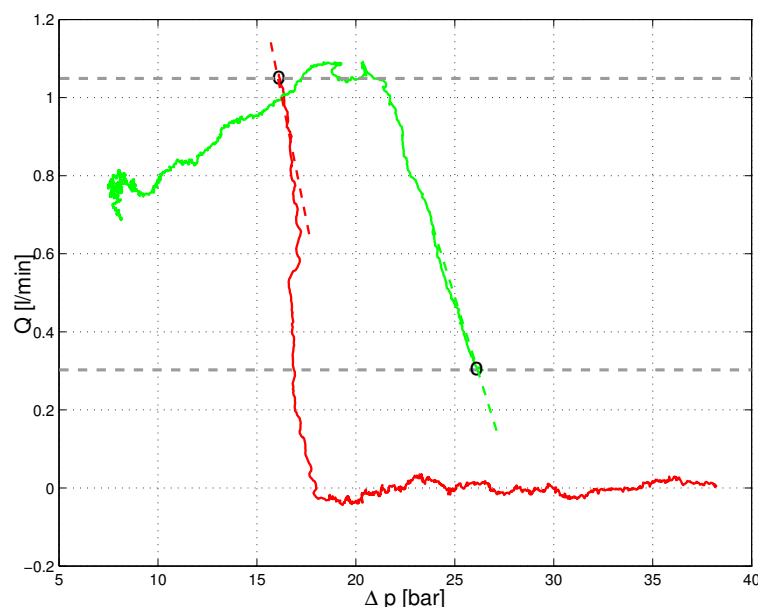


Abb. 10.2: Durchflußkennlinie aus Testschritt *Bypass Test*.

mit dem in Abschnitt 7.4 beschriebenen Vorgehen das Diagnoseergebnis für beide Systeme ermittelt und direkt dargestellt. Aus den Kennwerten der intakten Baugruppe wird das Ergebnis *Bypass-Ventile intakt* abgeleitet.

Im *Check of Spool Valve Adjustment* wird die Einstellung des hydraulischen Nullpunkts gegenüber dem anhand des *MCV-LVDT Tests* ermittelten elektrischen Nullpunkts überprüft. Kriterium einer korrekten Einstellung ist die Drucksymmetrie zwischen den beiden Systemen. Für die intakte Baugruppe stimmt die Einstellung und die sonst notwendige Justierung kann entfallen.

Während des Testschritts *Current Stroke Characteristic* wird eine quasistatische Strom-Weg Kennlinie aufgenommen. Analog zum Testschritt *MCV-LVDT Tests* werden anhand der externen Referenzmessung Verstärkungsfaktoren und Offset für die Spannungswerte der

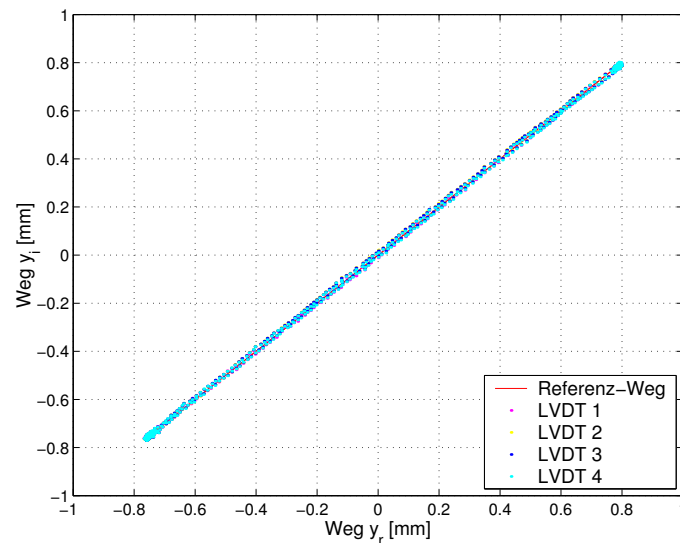


Abb. 10.3: LVDT-Hysterese aus Testschritt *Current Stroke Characteristic*.

LVDT-Sensoren bestimmt. Für die Messungen der einzelnen LVDTs ergibt sich daraus der in Abb. 10.3 dargestellte Zusammenhang zur externen Referenzmessung y_r . Die Kennlinie wird bis zur mechanischen Begrenzung im Valve Assembly aufgenommen.

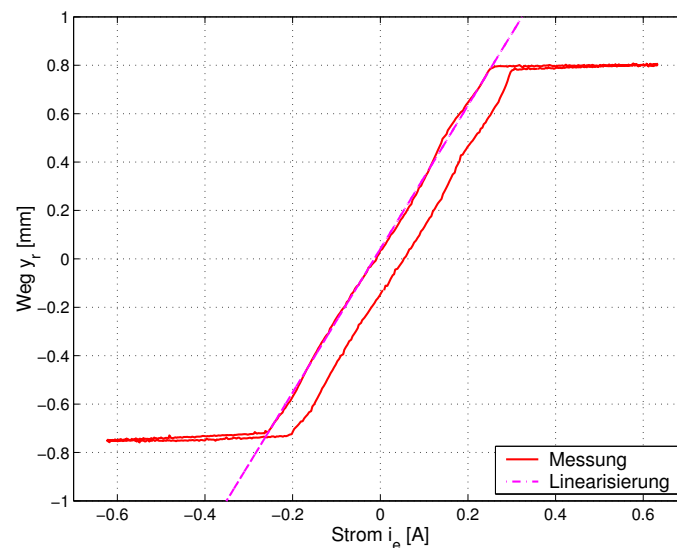


Abb. 10.4: Weghysterese aus Testschritt *Current Stroke Characteristic*.

Die summierten, quadrierten Abweichungen (Varianz) von der Ausgleichsgeraden werden als Gütekriterium für den jeweiligen Sensor verwendet. Für die weiteren Testschritte ohne externen Referenzsensor wird nun der Sensor mit der kleinsten Meßwert-Varianz selektiert. Die Darstellung des Ventilwegs über dem eingprägten Strom (siehe Abb. 10.4) ergibt die Weghysterese des Ventils. Die Hysteresenbreite wird durch mechanische Reibung und die Eisenhysterese bestimmt. Aus der Steigung lassen sich Aussagen über die magnetische Kopplung gewinnen.

Nach den wegstatistischen Testschritten wird das Ventil im Testschritt *Stroke Response* wegdy-
namisch ohne passive Last (freie Bewegung) betrieben. In den Performance-Kenngrößen sind
dazu Sprungantworten bei vorgegebenen Stromwerten definiert. Aus dem Vergleich mit no-

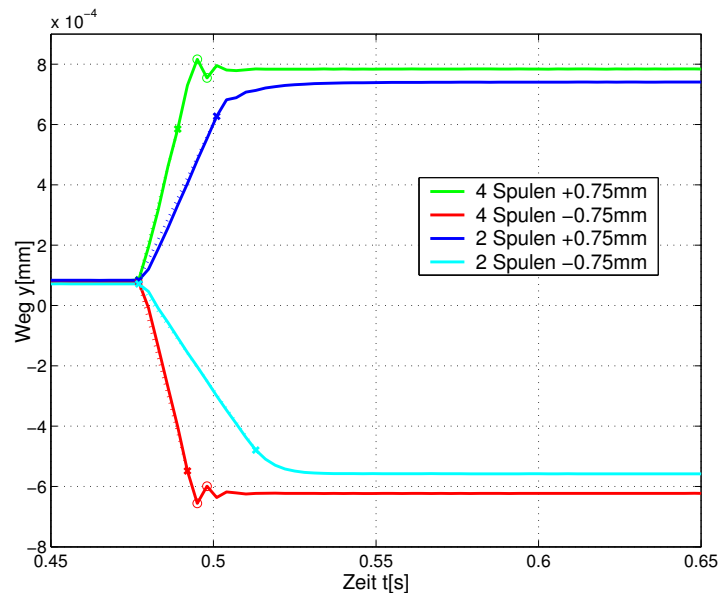


Abb. 10.5: Sprungantworten aus Testschritt *Stroke Response*.

minalen Verläufen können mittels der charakteristischen Größen Endwert, Anstiegszeit und Überswinghöhe relativ zum fehlerfreien Fall Aussagen abgeleitet werden. Für die analytischen Diagnoseverfahren wird jedoch zusätzlich eine dynamische Anregung verwendet. Die Paritätsraumverfahren können aufgrund der in Kapitel 6 beschriebenen Vorteile direkt angewendet werden, während eine gute Konvergenz des EKF zur Parameterschätzung die im Testablauf erst später bestimmten Kenngrößen der Strom-Kraft Kennlinie voraussetzt.

Die hydraulischen Kenngrößen des Ventils werden zur Referenzierung der nominal bekannten Performance-Kenngrößen im Testschritt *Hydraulic Tests* überprüft. Der in Abb. 10.6 dargestellte maximale Durchfluß bei verbundenen Verbraucheranschlüssen wird durch einen hohen Druckabfall im Leitungssystem vor dem Ventil bestimmt. Anforderung ist ein erreichter Volumenstrom von $Q > 50 \frac{l}{min}$.

Aus dieser Darstellung des Durchflusses über den Weg y (Volumenstrom-Signalfunktion, [Mur98b]) wird auch die wegabhängige Durchflußverstärkung ermittelt. Bei vollständig geöffnetem Ventil ergibt sich mit dem maximalen Durchfluß ein typischer Wert von $V = 75 \frac{l}{min \cdot mm}$. Zusätzlich lassen sich Aussagen gewinnen über:

- Hysterese
- Symmetrie und Linearität
- Überdeckungsverhältnisse

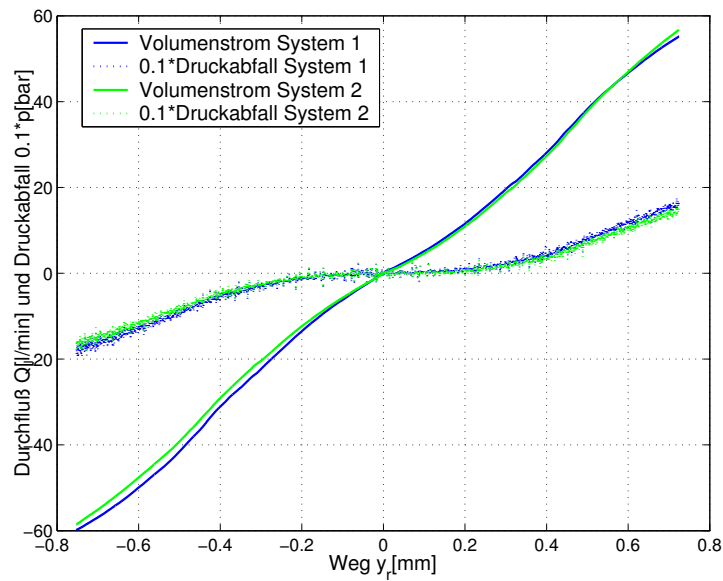


Abb. 10.6: Maximaler Durchfluß aus Testschritt *Hydraulic Tests*.

Zur besseren Darstellung der Überdeckungsverhältnisse im Nullbereich wird in Abb. 10.7 ein kleinerer Bildausschnitt gewählt.

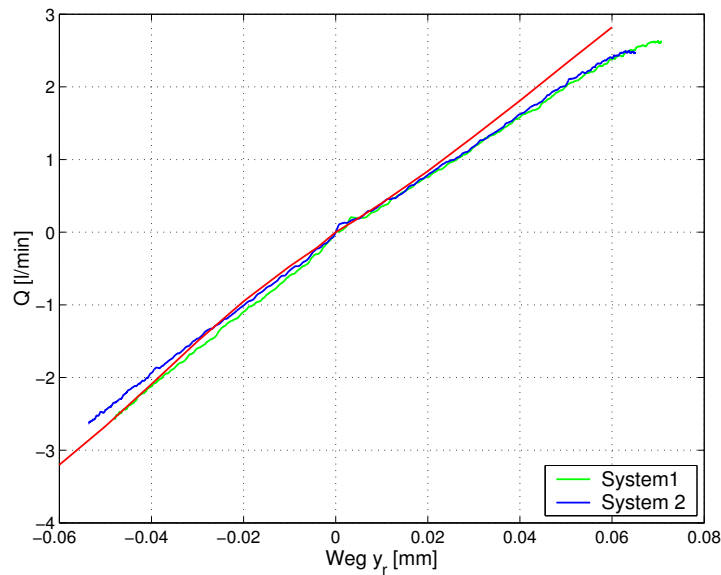
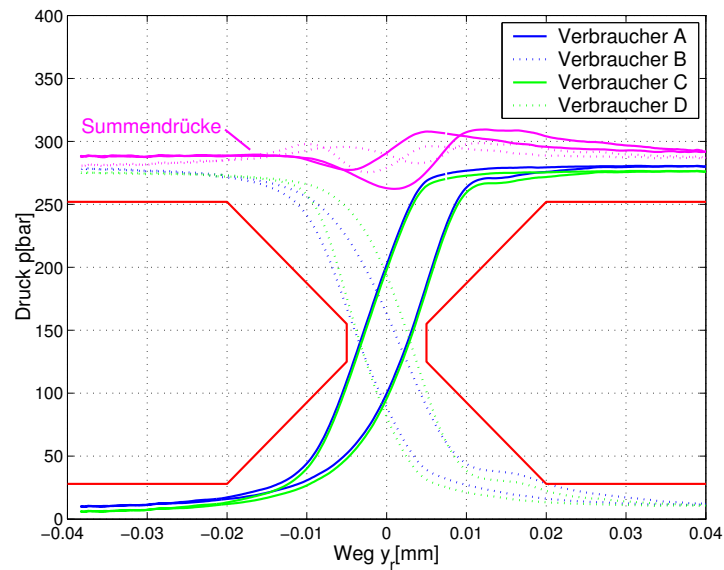


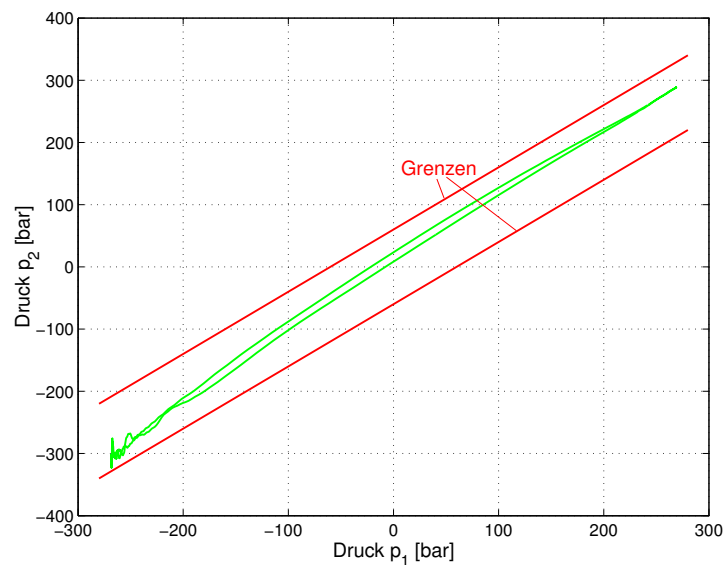
Abb. 10.7: Nulldurchfluß aus Testschritt *Hydraulic Tests*.

Eine sehr exakte Aussage über die Überdeckungsverhältnisse erhält man auch aus der Druckverstärkung, die bei geschlossenen Verbraucheranschlüssen gemessen wird. Im Idealfall ist die Überdeckung an allen Steuerkanten gleich groß und es ergibt sich ein konstanter Summendruckverlauf über den Ventilweg.

Asymmetrien in den Steuerkanten verursachen einen betragsmäßig nicht konstanten Verlauf. Die Einhaltung der Spezifikation wird durch Grenzkurven überprüft, die nicht überschritten

Abb. 10.8: Druckverstärkung aus Testschritt *Hydraulic Tests*.

werden dürfen. Diese basieren auf dem Nominalverhalten zuzüglich einer mit dem Flugzeughersteller vereinbarten Toleranz.

Abb. 10.9: Kraftkonflikt aus Testschritt *Hydraulic Tests*.

Im Testschritt *Internal Leakage* wird der Nulldurchfluß innerhalb eines Systems über den Ventilschieber ausgewertet. Dazu wird der Volumenstrom in der Rückleitung bei geschlossenen Verbraucheranschlüssen und einer vorgegebenen Druckdifferenz $\Delta p = p_S - p_R$ zwischen Druck- und Rückleitung gemessen. Dieser Nulldurchfluß entsteht durch das Radialspiel zwischen Buchse und Steuerschieber. Zur Verringerung der entstehenden Verlustleistung wurde die Portöffnung als trapezförmige Fläche mit schmalen Beginn ausgelegt. Der Volumenstrom Q hat im hydraulischen Nullpunkt sein Maximum. Bei einem Verschleiß der Steuerkanten

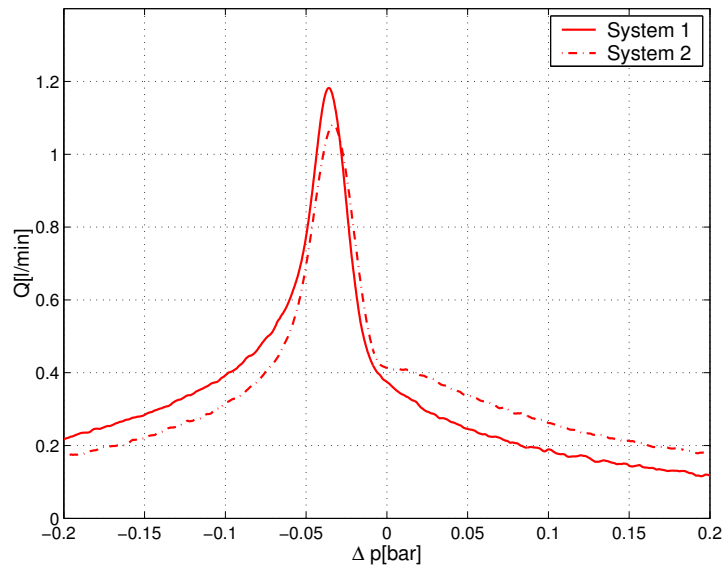
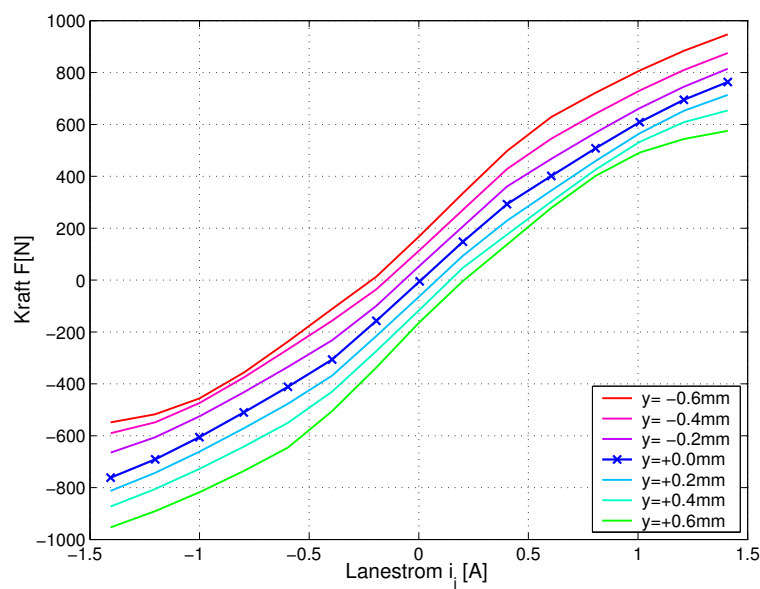


Abb. 10.10: Interne Leckage am Valve Assembly.

steigt dieser Wert an. Aus der Überschreitung des Nominalwerts kann so ein Symptom für den Steuerkantenverschleiß generiert werden. Die Kennlinie ist dabei von dem Systemdruck p_S abhängig: Der Nulldurchfluß steigt linear mit dem Systemdruck und der hydraulische Nullpunkt verschiebt sich durch asymmetrische Verformung der Dichtelemente (Schieber und Buchse). Für die Diagnose werden diese Abhängigkeiten jedoch nicht ausgewertet.

Abb. 10.11: Strom-Kraft Kennlinien aus Testschritt *Force Generation*.

Die Bestimmung der nichtlinearen Strom-Kraft Kennlinie erfolgt im Testschritt *Force Generation*. Dazu wird die Motorachse an verschiedenen Positionen mit der hydraulischen Bremse blockiert und die quasistatische Kraft bestimmt. Dies ergibt das in Abb. 10.11 dargestellte

Kennfeld.

Analog zum Identifikationsvorgehen für das Spulenmodell werden aus der Kennlinie in Mittenposition die charakteristischen Parameter C_{aif} und C_{bif} und aus den Endwerten von Strom und Spannung der ohmsche Widerstand R_e bestimmt. Mit einer dynamischen Anregung in Mittenposition können unter Vernachlässigung der Gegeninduktion K_{ind} und der Reibung nun mit einem EKF die Parameter K_{ee} , K_{eh} , K_{hh} und R_{Fe} bestimmt werden. Aus dem Ver-

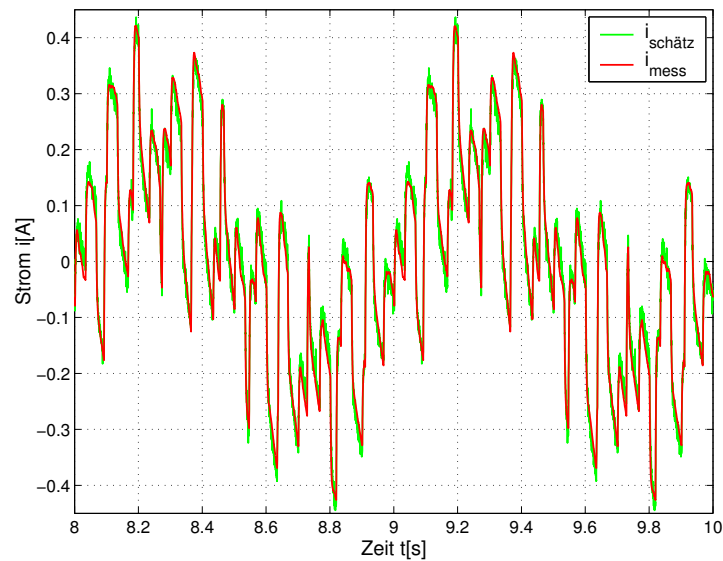


Abb. 10.12: Schätzung des Spulenstroms bei dynamischer Anregung.

gleich mit den Nominalwerten lassen diese eine umfassende Diagnose des elektrischen Teils zu.

Die Strömungskräfte werden im Testschritt *Bernoulli Forces* bestimmt. Wie in Abb. 10.13 dargestellt, wird dazu an fester Position die Kraft in Abhängigkeit von der bei vorgegebenem Differenzdruck ausgebildeten Durchströmung gemessen.

Mit *Dynamic Tests* werden die Parameter der freien Bewegung diagnostiziert.

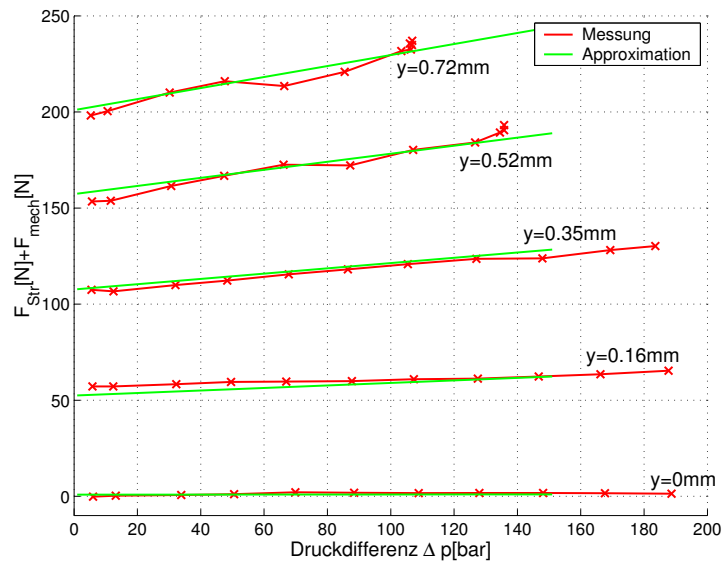
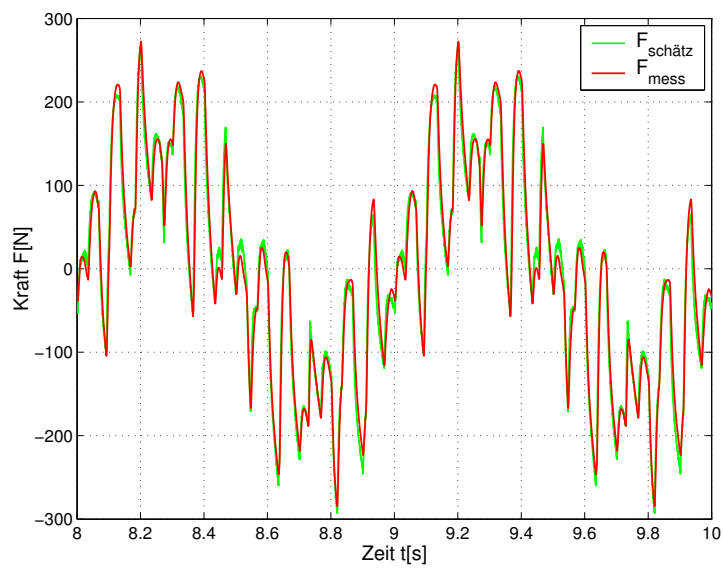
Abb. 10.13: Strömungskräfte aus Testschritt *Bernoulli Forces*.

Abb. 10.14: Schätzung des Kraftverlaufs bei dynamischer Anregung.

10.2 Wartungsdiagnose fehlerbehafteter Prüflinge

Die Verifikation der Prüfstandsfunktionalität wird sequentiell mit einzelnen Fehlereinbauten durchgeführt. Die hierbei entstehenden Datensätze können auch für spätere Validierungen der Prüfstandsfunktionalität herangezogen werden, ohne die Prüflinge hierzu neu modifizieren zu müssen.

Bei falsch positioniertem Motor (Nullpunkt des Motors gegenüber hydraulischem Nullpunkt verschoben) ergibt sich aufgrund der Anschläge im Ventil ein einseitig beschränkter Verfahrensweg. Bei einem Positionsfehler von $\Delta y > 0,54mm$ ergibt sich in einer Richtung ein Verfahrensweg von $|y| < 0,3mm$ und die Diagnose wird abgebrochen.

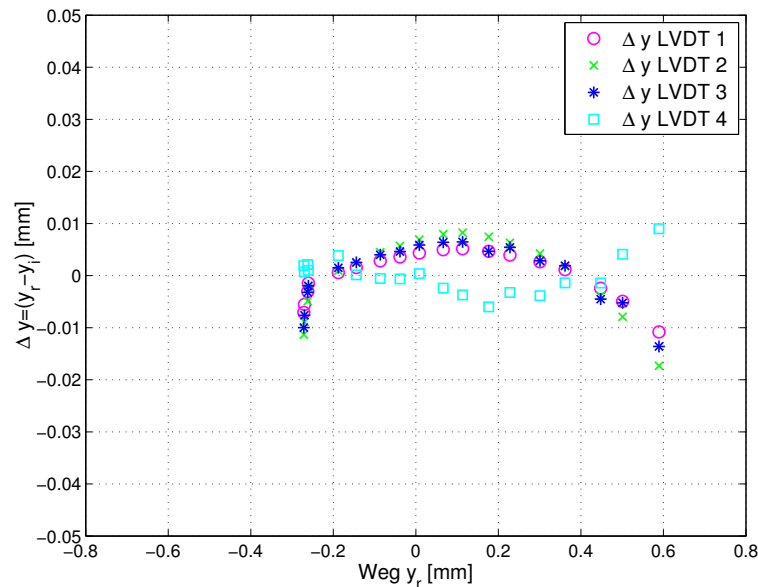


Abb. 10.15: *MCV-LVDT Tests* mit asymmetrischer Motorpositionierung.

Eine weitere Möglichkeit, die zum Abbruch des Diagnoseablaufs führt, ist der mechanisch blockierte Motor. Dieser Fehlerfall wird durch eine Auftrennung der Stromkreise nachgebildet. Der minimale Verfahrensweg wird hier nicht erreicht und deshalb im Testschritt *MCV-LVDT Tests* ebenfalls ein Diagnoseabbruch ausgelöst.

Verbliebene Dejustagen zwischen elektrischem und hydraulischem Nullpunkt werden im Testschritt *Spool Valve Adjustment* korrigiert. Danach ist der durch die Feder- und Permanentmagnetkräfte bestimmte elektrische Nullpunkt des Motors auf den hydraulischen Nullpunkt abgestimmt. Die geometrische Mittenlage bezogen auf das Joch des Motors ist damit jedoch nicht gewährleistet.

Die beiden Testschritte *Current Stroke Characteristic* und *Stroke Response* bewerten die Abweichung der Messung vom Nominalverhalten und ermitteln die beiden Parameter C_{aif} und C_{bif} . Ein direkter Rückschluß auf physikalische Fehler ist mit diesen Merkmalen und Symptomen nicht möglich.

Widerstandsfehler werden im Testschritt *Force Generation* direkt über die statischen Endwerte von Lane-Strom und Lane-Spannung gemessen. Alle vorangehenden Testschritte verwenden keinen Zusammenhang zwischen Spannung und Strom. Für den Testablauf können deshalb die statischen Meßgrößen verwendet werden, wodurch auch eine sichere Unterscheidung der Fehler in einzelnen Spulen möglich ist.

Für die Identifikation des zeitlichen Verhaltens wird das beschriebene Einspulenmodell verwendet. Der ohmsche Eingangswiderstand R_e wird dabei mit dem mittleren Wert der vier parallelen Einzelspulen belegt. Die Parameteridentifikation erlaubt damit die quantitative Bestimmung von Wirbelstromwiderstand und Eigeninduktivität. Die Validierung der mit dynamischer Anregung identifizierten Parameter erfolgt über die Zeitkonstante des elektrischen Systems.

Die Strömungskräfte werden im Testschritt *Bernoulli Forces* mit dem gemessenen Volumenstrom direkt bestimmt. Eine Abweichung von der Nominalkennlinie wird als Fehler im System Steuerkante/Portgeometrie gewertet, ohne einen genaueren Rückschluß auf den geometrischen Ort zu geben.

In der freien Bewegung des Ventils wird zusätzlich die hydraulische Dämpfung d_{vis} und Coulombsche Reibung $F_{C,VA}$ identifiziert.

Aus den Symptomen der einzelnen Testschritte können alle Fehler sicher lokalisiert werden. Ferner bietet die Parameteridentifikation die Möglichkeit einer quantitativen Fehlerrückmeldung. Bezogen auf die physikalischen Parameter kann folgendes Ergebnis erreicht werden:

Fehler	gefunden	quantitative Diagnose
Widerstand R_i	x	<5%
Wirbelstromwiderstand R_{Fe}	x	15%
(Eigen-)Induktivität L_{ii}	x	20%
Reibung $F_{C,VA}$	x	10%
Dämpfung d_{vis}	x	5%
Leckage Q_{Li}	x	5%

Tabelle 10.1: Quantitative Diagnoseaussage Valve Assembly.

Diagnosevorgehen und -aussage sind am Motor Assembly bis auf den unberücksichtigten Valve Block identisch. Für die physikalischen Parameter ergibt sich die in Tabelle 10.2 aufgeführte quantitative Aussage.

Am Gesamtgerät lassen sich die Strömungskräfte und -beiwerte am Ventil nicht mehr mittels einer direkten Messung bestimmen. Durch die Verkopplung mit weiteren unsicheren Parametern nimmt hier die quantitative Genauigkeit ab. Dies führt ferner zu einer verringerten Genauigkeit für die Coulombsche Reibung $F_{C,VA}$. Ohne hydraulischen Druck läßt sich die

Fehler	gefunden	quantitative Diagnose
Widerstand R_i	x	<5%
Wirbelstromwiderstand R_{Fe}	x	15%
(Eigen-)Induktivität L_{ii}	x	20%
Reibung $F_{C,MA}$	x	10%

Tabelle 10.2: Quantitative Diagnoseaussage Motor Assembly.

Reibung ohne Verkopplung mit den Strömungskräften bestimmen. Der erhöhte Reibwert mit Druckbeaufschlagung kann jedoch nicht direkt gemessen werden. Weiter sind durch die direkte hydraulische Verbindung von Valve und Ram die Leckagen nicht eindeutig lokalisierbar. Zum Test wird daher lediglich die interne Leckage zwischen den beiden Kammern eines Systems bewertet. Diese kann sowohl auf der Verbraucherseite des Ventils als auch im Stellzylinder auftreten. Abgesehen vom hydraulischen Teil können Motor und Ventil mit derselben Adaption auch am Gesamtgerät identifiziert werden. Für die physikalischen Parameter ergibt sich folgende quantitative Aussage:

Fehler	gefunden	quantitative Diagnose
Widerstand R_i	x	<5%
Wirbelstromwiderstand R_{Fe}	x	15%
(Eigen-)Induktivität L_{ii}	x	20%
Reibung $F_{C,VA}$	x	15%
Reibung $F_{C,RA}$	x	10%
Dämpfung d_{vis}	x	5%
Leckage Q_{Li}	x	5%

Tabelle 10.3: Quantitative Diagnoseaussage Rudder Actuator.

Die erreichte Schätzgenauigkeit der Parameter erlaubt es, für Einzelfehler die Grenzen der Performance-Spezifikation einzuhalten.

11 Zusammenfassung und Ausblick

Gegenstand dieser Arbeit ist, mit analytischen Diagnoseverfahren die heute angewendeten Methoden zur Serienabnahme und Wartung komplexer mechatronischer Systeme zu verbessern. Als Beispielanwendung wird dazu ein sicherheitskritischer, elektrohydraulischer Aktuator der primären Flugsteuerung betrachtet. Der Aktuator mit hydraulischen, mechanischen, elektrischen und elektronischen Komponenten zeigt gleichzeitig die Übertragbarkeit der Verfahren auf eine große Anzahl mechatronischer Systeme mit nichtlinearem Übertragungsverhalten.

Nach einer Analyse der Ergebnisanforderungen wird ein mathematisches Modell des Aktuators als Grundlage der modellgestützten Diagnoseverfahren erstellt. Neben dem nominalen, fehlerfreien Modell werden Fehler und Modellunsicherheiten zur Erhöhung der Robustheit betrachtet.

Die gute physikalische Abbildung des nichtlinearen Modells stellt gleichzeitig hohe Anforderungen an die analytischen Diagnosemethoden. Aufgrund der Eignung für nichtlineare Systeme mit überlagerten, stochastischen Störungen werden Paritätsgleichungen und das erweiterte Kalman-Filter (EKF) verwendet. Beide Verfahren werden in der Anwendung weiter verbessert: Ziele sind dabei insbesondere Robustheit gegenüber Signalstörungen und Unsicherheiten der Prüflinge sowie die direkte physikalische Interpretierbarkeit der Diagnoseausagen. Neben der Lokalisierung der Fehlerursache wird auch die Quantifizierung der Fehler angestrebt. Für Paritätsgleichungen werden durch die Erweiterung auf polynomiale Modelle und symbolischen Entwurf deutliche Verbesserungen gegenüber konventionellem Vorgehen mit linearen Ersatzmodellen erzielt. Trotzdem führt die statistische Interpretation des EKF gegenüber dem deterministischen Ansatz der Paritätsgleichungen vor allem bei Signalstörungen zu besseren Ergebnissen.

Verbesserungen zur Fehlerdiagnose mit Paritätsgleichungen erfordern im Entwurf eine sehr hohe Rechenleistung, wodurch insbesondere für den symbolischen Entwurf heute noch Einschränkungen bestehen. Abhilfe hierfür ist durch steigende Prozessorleistungen und leistungsfähigere Softwaretools zu erwarten.

Zusätzlich zu den Ergebnissen der analytischen Diagnoseverfahren werden statisch meßbare Parameter und linguistische Fehlerhinweise des Bedieners in einer wissensbasierten Ergebnisklassifikation verarbeitet. Zur regelbasierten Formulierung der Abhängigkeiten und Implementation wird die Fuzzy-Logik verwendet. Durch die parallele Verwendung von zwei analytischen Diagnoseverfahren und zusätzlichen Merkmalen kann jede Fehlerhypothese mehrfach validiert werden. Hierdurch ist eine zweite Möglichkeit zur Erhöhung der Robustheit realisiert.

Die Funktionalität wird schließlich mit physikalischen Fehlereinbauten verifiziert. Die Integration repräsentativer Fehler ist damit ohne Modifikation des Prüflings einfach und repro-

duzierbar möglich. Mit diesem Vorgehen wird die Möglichkeit einer detaillierten Diagnose belegt und die Tauglichkeit für den industriellen Einsatz nachgewiesen. Vorteile gegenüber dem bisherigen Vorgehen sind insbesondere:

- automatischer Diagnoseablauf
- genaue Fehlerlokalisierung
- detaillierte Wartungsanweisungen
- quantitative Zustandsbeschreibung mit Möglichkeit einer Trendaussage

Die Qualifizierung des Aktuators wurde bisher aufgrund der vereinbarten Bewertungsgrößen noch über die Abweichungen gegenüber der Performance-Charakteristik des Nominalverhaltens durchgeführt. Mit den aufgezeigten quantitativen Genauigkeiten läßt sich nun ein großer Teil der Qualifikation durch Prüfung physikalischer Prozeßparameter ersetzen und die Transparenz der Qualifikation deutlich erhöhen. Im Prüfstandtest wird dadurch ein einfacher Rückschluß auf die Systemkomponenten und deren Herstellungsprozesse möglich, der so eine quantitativ belegbare Produktionsstatistik erlaubt.

Für eine spätere on-board Anwendung kann der Aktuator nur als Gesamtgerät betrieben werden. Zudem stehen lediglich die zur Regelung notwendigen, internen Wegmessungen (LVDTs) und die Strommessungen der Einzelspulen zur Verfügung. Mit diesen Signalen lassen sich nur Fehlergruppen über Parameteränderungen in Ersatzmodellen [Oeh94] lokalisieren. Im Rahmen einer pre- oder post-flight Diagnose wird der Aktuator mit den bekannten Massen und Einbausteifigkeiten, aber unbekannter Reibung, betrieben. In-flight müssen als zusätzliche Unsicherheit unbekannte aerodynamische Kräfte an den Steuerflächen berücksichtigt werden. Dies verschlechtert zusätzlich die erreichbare Diagnosetiefe.

Um trotzdem eine akzeptable Diagnosetiefe zu erreichen, müssen zusätzliche Meßgrößen aufgenommen werden. Die dazu notwendige Sensorik darf jedoch in ihrem Ausfallverhalten keine Rückwirkung auf die Ausfallsicherheit des Aktuators haben. Als zusätzliche Meßgrößen kommen in Frage:

- Spannungen der Einzelspulen
- Kraft des Stellzylinders
- Kraft am Motor

Eine Druck- oder Durchflußmessung scheidet in Anbetracht der direkten Integration in die Hydraulikleitungen aus. Zudem sind keine zeitlich konstanten Durchflüsse einstellbar. Mit der begrenzten Dynamik der üblichen Zahnrad-Durchflußmeßgeräte können deshalb keine verwertbaren Messungen durchgeführt werden.

Dennoch kann mit der erreichbaren Diagnosetiefe eine bedarfsgerechte Wartung (maintenance on condition) umgesetzt werden. Wenn ein Fehler indiziert wird, ist zur genauen Lokalisierung, Ableitung der notwendigen Instandsetzungsmaßnahmen und Lebensdauerüberwachung die vorgestellte Prüfstandsdiagnose weiter notwendig.

Diese Arbeit ist eine konsequente Weiterentwicklung der am Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik bereits früher entwickelten Verfahren in den Bereichen Modellbildung, Regelung und Diagnose. Mit den erzielten Ergebnissen ist eine Grundlage für zukünftige Arbeiten zu den beschriebenen on-board Applikationen geschaffen.

A Anhang

A1 Begriffserklärungen

Für den Bereich modellbasierter, technischer Diagnose wird zur Zeit versucht [vS99], die noch unterschiedlichen Begriffsdefinitionen international zu vereinheitlichen. Dieser Prozeß ist jedoch noch nicht abgeschlossen. Die in dieser Arbeit verwendete Nomenklatur ist an die VDI-Nomenklatur [286] angelehnt. Die wichtigsten Begriffe werden in der folgenden Übersicht erläutert:

Abweichung: Unterschied zwischen einem Merkmalswert oder dem einem Merkmal zugeordneten Wert und einem Bezugswert.

Ausfall: Beendigung der Funktionsfähigkeit eines Systems aufgrund eines bleibenden Fehlers.

Fehler: Unzulässige Abweichung von mindestens einer charakteristischen Eigenschaft oder eines Parameters der betrachteten Strecke von seinem nominellen oder typischen Wert.

Fehlererkennung, Fehlerdetektion: Feststellung, ob ein Fehler vorliegt sowie Bestimmung des Zeitpunkts des Auftretens.

Fehlerdiagnose: Beurteilung aufgetretener Fehler, um die Ursache eines aufgetretenen Fehlers zu ermitteln. Die Fehlerdiagnose setzt die Fehlererkennung voraus.

Fehleridentifikation: Bestimmung von Fehlergröße und Zeitabhängigkeit des Fehlers nach erfolgter Fehlerisolierung.

Fehlerisolierung: Bestimmung von Fehlerart, Fehlerort und Zeitpunkt des Auftretens nach erfolgter Fehlererkennung.

Fehlerklassifikation: Auswahl des Fehlers aus einer Menge von Fehlermöglichkeiten anhand charakteristischer Eigenschaften, Merkmalen und Symptomen.

Fehlerursache: Physikalischer oder chemischer Prozeß, Designfehler, fehlerhafte Anwendung oder Qualitätsmangel, was Grund für die Entstehung eines Fehlers oder des zum Fehler führenden Prozesses ist.

Inferenz: Auswertung einer Regel.

Merkmal: Charakteristische Eigenschaft, die zur Fehlerklassifikation verwendet wird. Merkmale sind quantitative (numerische) oder qualitative (linguistische) Werte, die direkt oder indirekt aus Eigenschaften, Kenngrößen oder Parametern des Prozesses und der meßbaren Signale erzeugt werden.

Nominelles Modell: Gewünschtes Prozeßverhalten ohne Berücksichtigung von Parameter-toleranzen und Störungen.

Residuum: Abweichung zwischen zwei Signalen, meist zwischen gemessenem und analytisch bestimmtem Signal, die als Fehlerindikator verwendet werden kann.

Robustheit: Eigenschaft eines Systems, die auch bei veränderten äußeren Bedingungen eine stabile Ausführung der Sollfunktion ermöglicht. Im Zusammenhang mit der Fehlerdiagnose wird die Robustheit auf die Zuverlässigkeit der Diagnoseaussage bei Unsicherheiten und Störungen bezogen.

Störung: Zeitabhängige Veränderung der Prozeßeigenschaften oder Systemzustände aufgrund unbekannter Eingänge oder Fehler.

Symptom: Ein Symptom ist eine Ausprägung des Fehlverhaltens eines Systems.

Unsicherheit: Unschärfe in der Beschreibung einer Modellstruktur oder eines einzelnen Parameterwerts, die nicht als Fehler betrachtet wird. Die Unsicherheit kann damit im Sinne eines quantitativen Prozeßmerkmals als zulässige Toleranz interpretiert werden.

Quantitatives Modell: Modell mit numerisch beschriebenen Parametern, denen eine Größe zugeordnet wird.

Qualitatives Modell: Modell ohne numerisch bestimmbare Parameter.

Wartung: Bewahrung des Sollzustands.

A2 Modellparameter

A2.1 Motor Assembly

$$\begin{aligned}
 C_{fed} &= 650 \frac{N}{mm} \\
 F_{C,MA} &= 7N \\
 m_{MA} &= 0,280kg \\
 C_{1perm} &= 327,24 \frac{N}{mm} \\
 C_{3perm} &= 82,516 \frac{N}{mm^3} \\
 K_{ind} &= 630 \frac{Vs}{m} \\
 K_{mag} &= 731,8 \frac{N}{Vs} \\
 C_{sat} &= 0,3753 \\
 R_e &= 23\Omega \\
 R_{Fe} &= 19,76\Omega \\
 K &= \begin{bmatrix} K_{ee} & K_{eh} \\ K_{eh} & K_{hh} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.5556 & -5.7733 \\ -5.7733 & 15.6034 \end{bmatrix}
 \end{aligned}$$

A2.2 Valve Assembly

$$\begin{aligned}
 F_{C,VA} &= 12N \\
 m_{VA} &= 0,335kg \\
 C_{Str} &= 4 \cdot 10^4 mm \\
 d_{hyd} &= 4 \cdot 10^{-3} \frac{Ns^2}{mm^2} \\
 d_{vis} &= 0,1 \frac{Ns}{mm} \\
 \alpha_D &= 0,62 \\
 E_{Fl} &= 3 \cdot 10^3 \frac{N}{mm^2}
 \end{aligned}$$

A2.3 Rudder Actuator

$$\begin{aligned}
 m_{RA} &= 20,0kg \\
 F_{C,RA} &= 975N
 \end{aligned}$$

A3 Fuzzy-Logik

Der Mensch verarbeitet Informationen häufig in unscharf formulierten Regeln. Neben scharf abgrenzbaren Fakten werden qualitative und heuristische Aspekte herangezogen, um eine Entscheidung zu treffen. Zadeh [Zad65] fügte die verschiedenen Ansätze mehrwertiger Logiken zur Fuzzy-Logik zusammen. Unscharfes Wissen und verbal formulierte Regeln können dann mit Digitalrechnern verarbeitet werden.

Nach einer kurzen Beschreibung der theoretischen Grundlagen werden die drei häufigsten Fuzzy-Systeme erläutert und für die Ergebnisklassifikation bewertet:

- Mamdani-Systeme
- Singleton-Systeme
- Tagaki-Sugeno-Systeme

Eine ergänzende, umfassende Darstellung zu Grundlagen der Fuzzy-Logik wird im Hinblick auf die Anwendung als Fuzzy-Regelung in [Fis99] und [KF93] gegeben. In dieser Arbeit wird zum Verständnis der Fuzzy-Klassifikation deshalb lediglich eine kurze Zusammenfassung wiedergegeben.

A3.1 Grundlagen der Fuzzy-Logik

Die Wissensverarbeitung kann prinzipiell in drei Schritte untergliedert werden:

- Informationsrepräsentation in unscharfen Mengen
- Informationsverarbeitung mit einer Regelbasis
- Generierung eines Ergebnisses

Ausführliche Darstellungen sind bei [Per90], [Ise91] und [Uli93] zu finden.

A3.2 Operationen auf unscharfe Mengen

Die Fuzzy-Logik kann als Erweiterung der klassischen Logik angesehen werden. Die zentrale Erweiterung ist dabei die Einführung unscharfer Mengen. Im klassischen Mengenbegriff gehört ein Element zu einer Menge oder nicht (Verknüpfung durch Exklusiv-Oder, XOR).

$$a \in AXORa \ni A \tag{A.1}$$

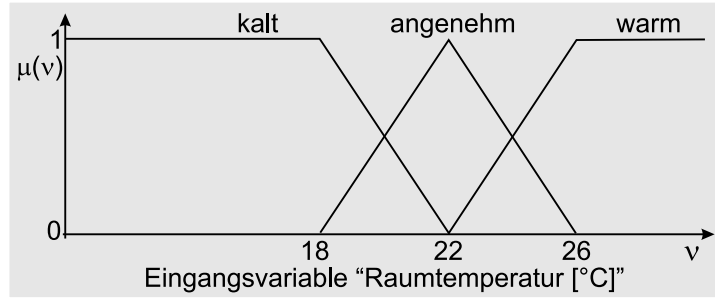


Abb. A.1: Beispiel zu Fuzzy-Mengen.

Im Gegensatz dazu erlauben Fuzzy-Mengen die Festlegung eines Zugehörigkeitsgrads. Dazu sollen mit dem folgenden Beispiel einige Grundbegriffe erläutert werden. Die Raumtemperatur wird in Abb. A.1 mit den Fuzzy-Zugehörigkeitsfunktionen $\mu(v)$ den Fuzzy-Mengen „kalt“, „angenehm“ und „warm“ zugeordnet. Bei einer Temperatur von 21°C können folgende Zugehörigkeiten μ abgelesen werden:

- $\mu_{„kalt“}(21^\circ\text{C}) = 0.25$
- $\mu_{„angenehm“}(21^\circ\text{C}) = 0.75$
- $\mu_{„warm“}(21^\circ\text{C}) = 0$

Dieses einfache Beispiel zeigt, wie linguistisch formulierte Unschärfe durch Fuzzy-Mengen nachgebildet werden kann.

Der Wertebereich, über dem Fuzzy-Mengen definiert werden, ist die sogenannte Grundmenge U ($U_v = [10^\circ\text{C} \dots 30^\circ\text{C}]$). Die Zugehörigkeitsfunktionen μ bilden scharfe Werte auf die unscharfen Mengen ab und können durch algebraische Gleichungen beschrieben werden:

$$\mu_{„kalt“}(v) = \begin{cases} 1 & , 10^\circ\text{C} \leq v < 18^\circ\text{C} \\ 1 - \frac{v-18}{6} & , 18^\circ\text{C} \leq v < 24^\circ\text{C} \\ 0 & , 24^\circ\text{C} \leq v \leq 30^\circ\text{C} \end{cases} \quad (\text{A.2})$$

Die Form der Zugehörigkeitsfunktionen kann beliebig gewählt werden. Am häufigsten werden jedoch dreieckige und trapezförmige Zugehörigkeitsfunktionen verwendet. Mit Hilfe sogenannter Singletons können scharfe Zahlenwerte als Fuzzy-Mengen dargestellt werden. Die Grundmenge nimmt nur an der Stelle der scharfen Zahl den Wert eins an und ist auf der restlichen Grundmenge zu null definiert. Für Anwendungen, die eine stetige Differenzierbarkeit der Zugehörigkeitsfunktionen erfordern, können Gaußsche Zugehörigkeitsfunktionen oder sogenannte B-Splines [BH94] verwendet werden. Unabhängig von der Form der Zugehörigkeitsfunktionen werden für die Zugehörigkeiten normalerweise Werte aus dem Intervall $0 \leq \mu \leq 1$ definiert, um die Interpretierbarkeit als Wahrheitswerte zu ermöglichen. Häufig werden die Zugehörigkeitsfunktionen der verschiedenen Fuzzy-Mengen so gewählt, daß sie

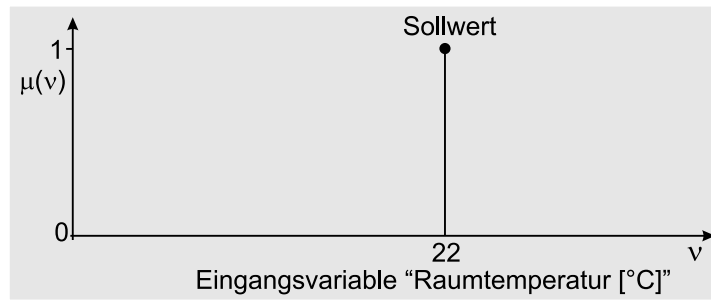


Abb. A.2: Beispiel zu Singletons in Fuzzy-Mengen.

sich in der Summe in jedem Punkt der Grundmenge U zu eins ergänzen. Jeder Wert ist dann vollständig den verschiedenen Fuzzy-Mengen zugeordnet. Eine Fuzzy-Menge \tilde{A} ist vollständig beschrieben, wenn jedem Element a aus der Grundmenge U_a eine Zugehörigkeit μ zugeordnet werden kann:

$$\tilde{A} = \{(a, \mu(a)) \mid a \in U_a\} \quad (\text{A.3})$$

Scharfe Mengen sind in dieser Definition als Spezialfall enthalten. Die definierten Fuzzy-Mengen bilden eine linguistische Variable („Raumtemperatur“). Die Bezeichnungen heißen Attribute, Terme oder Labels.

In der Mengenlehre sind die Operationen Schnittmenge (\cap), Vereinigungsmenge (\cup) und Komplementärmenge (\neg) definiert. In der nachstehenden Tabelle A.1 wird der Zusammenhang dieser Mengenoperationen mit den Operatoren UND (\wedge), ODER (\vee) und NICHT (\neg) aus der klassischen Logik aufgezeigt. Die Prüfung auf Zugehörigkeit ergibt für die klassische Logik einen binären Wert. Für unscharfe Mengen wird ein reeller Zugehörigkeitswert definiert, zu dessen Berechnung arithmetische Vorschriften eingeführt werden [KF93]:

- t-Normen zur Berechnung der UND-Verknüpfungen
- s-Normen (t-Konormen) zur Berechnung der ODER-Verknüpfungen

In der Tabelle A.1 sind die am häufigsten gebräuchlichen MIN/MAX- und PROD/SUM-Operatoren [Zim85] gegenübergestellt.

A3.3 Fuzzy-Relationen

Zur Beschreibung von Beziehungen zwischen Elementen unterschiedlicher Grundmengen U_a und U_b werden Fuzzy-Relationen eingeführt.

$$\begin{aligned} \tilde{A} &= \{(a, \mu(a)) \mid a \in U_a\} \\ \tilde{B} &= \{(b, \mu(b)) \mid b \in U_b\} \end{aligned} \quad (\text{A.4})$$

Operation	Definition	MIN/MAX	PROD/SUM
Schnitt	$C = A \cap B$ $= \{c c \in A \wedge c \in B\}$	$\mu_C(c) = \min[\mu_A(c), \mu_B(c)]$	$\mu_C(c) = \mu_A(c) \cdot \mu_B(c)$
Vereinigung	$C = A \cup B$ $= \{c c \in A \vee c \in B\}$	$\mu_C(c) = \max[\mu_A(c), \mu_B(c)]$	$\mu_C(c) = \mu_A(c) \cdot \mu_B(c)$ $-\mu_A(c) \cdot \mu_B(c)$
Komplement	$C = \neg A = \{c c \ni A\}$	$\mu_C(c) = 1 - \mu_A(c)$	

Tabelle A.1: Mengenoperationen und arithmetische Berechnung der Zugehörigkeiten.

Die Relation wird auf der Produktmenge P der beiden Grundmengen

$$P = U_a \times U_b = \{(a, b) \mid a \in U_a \wedge b \in U_b\} \quad (\text{A.5})$$

definiert:

$$\tilde{R} = \{((a, b), u_{\tilde{R}}(a, b)) \mid (a, b) \in U_a \times U_b\} \quad (\text{A.6})$$

Zwei Relationen mit Elementen der Grundmengen U_a und U_b sowie U_b und U_c können miteinander verknüpft werden.

$$\begin{aligned} \tilde{R}_1 &= \{((a, b), u_{\tilde{R}_1}(a, b)) \mid (a, b) \in U_a \times U_b\} \\ \tilde{R}_2 &= \{((b, c), u_{\tilde{R}_2}(b, c)) \mid (b, c) \in U_b \times U_c\} \end{aligned} \quad (\text{A.7})$$

Die Verknüpfung \tilde{R}_{12} beschreibt die Beziehung zwischen den Elementen der Grundmengen U_a und U_c .

$$\tilde{R}_{12} = \tilde{R}_1 \circ \tilde{R}_2 = \{((a, c), u_{\tilde{R}_{12}}(a, c)) \mid (a, c) \in U_a \times U_c\} \quad (\text{A.8})$$

Die Zugehörigkeit zur Verknüpfungsmenge berechnet sich definitionsgemäß nach der MIN/MAX-Komposition:

$$\tilde{R}_{12}(a, c) = \max_b [\min [\mu_{\tilde{R}_1}(a, b), \mu_{\tilde{R}_2}(b, c)]] \quad (\text{A.9})$$

Das Ergebnis der Operation gibt die Zugehörigkeit der Wertepaare (a, b) zu \tilde{R}_1 und (b, c) zu \tilde{R}_2 an. Die Argumente a und c sind dabei fest vorgegeben. Das Element b ist in beiden Zugehörigkeiten enthalten und wird so gewählt, daß der Minimum-Operator sein Maximum annimmt.

A3.4 Inferenz von WENN-DANN-Regeln

Die bisher eingeführten Operationen werden im Rahmen der Fuzzy-Inferenz dazu angewendet, um eine Regelbasis aus WENN-DANN-Regeln auszuwerten.

$$\begin{array}{ll}
 \text{Regel}_1 & : \quad \text{WENN } a \text{ ist } \tilde{A}_1 \text{ DANN } b \text{ ist } \tilde{B}_1 \\
 & \quad \vdots \\
 \text{Regel}_N & : \quad \text{WENN } a \text{ ist } \tilde{A}_N \text{ DANN } b \text{ ist } \tilde{B}_N
 \end{array} \tag{A.10}$$

Die Inferenz umfaßt zwei Teilaufgaben:

- Bestimmung des Wahrheitsgrads der einzelnen Regeln (Aktivierung)
- Zusammenfassung aller Aktivierungen (Akkumulation)

In der Prämisse (WENN-Teil) einer Regel wird die Zugehörigkeit eines Elements a zu einer Fuzzy-Menge \tilde{A} geprüft und in der Konklusion (DANN-Teil) auf die Zugehörigkeit eines Elements b zu einer Fuzzy-Menge \tilde{B} geschlossen. Im Vergleich zu klassischen Schlußfolgerungsmechanismen kann mit dem zugrundeliegenden approximativen Schließen auch eine Aussage geliefert werden, wenn die Prämisse nur näherungsweise zutrifft. So wird von einem Element a , das nicht exakt zu \tilde{A} gehört, auf eine Zugehörigkeit von b zur Menge \tilde{B}' geschlossen, die wiederum von \tilde{B} abweicht.

Als Inferenzmechanismus wird der verallgemeinerte Modus ponens nach [Zad73] verwendet, der in Analogie zum klassischen Modus ponens der binären Logik definiert wird. Eine Regel kann danach auch als Implikation dargestellt werden. Für unscharfe Mengen wird eine Implikationsrelation \hat{N} dargestellt, mit der für ein Wertepaar (a, b) aus der Produktmenge $U_a \times U_b$ der Erfüllungsgrad einer Regel dargestellt werden kann. Oft verwendet wird die Definition von Mamdani:

$$\hat{N} = \{((a, b), \mu_{\hat{N}}(a, b)) \mid (a, b) \in U_a \times U_b, \mu_{\hat{N}}(a, b) = \min[\mu_{\tilde{A}}(a), \mu_{\tilde{B}}(b)]\} \tag{A.11}$$

Das Ergebnis der Aktivierung ergibt sich durch Verknüpfung der unscharfen Menge des Faktums \hat{A}' mit der Implikationsrelation \hat{N} :

$$\hat{B}' = \hat{A}' \circ \hat{N} = \{(b, \mu_{\hat{B}'}(b)) \mid b \in U_b, \mu_{\hat{B}'}(b) = \max_a [\min[\mu_{\hat{A}'}(a), \mu_{\hat{N}}(a, b)]]\} \tag{A.12}$$

Die Berechnungsvorschrift für die Zugehörigkeit $\mu_{\hat{B}'}(b)$ nach der MAX-MIN-Komposition in Gleichung (A.9) kann nach Einsetzen von $\mu_{\hat{N}}(a, b)$ aus Gleichung (A.11) folgendermaßen umgeformt werden:

$$\mu_{\hat{B}'}(b) = \max_a [\min[\mu_{\hat{A}'}(a), \min[\mu_{\tilde{A}}(a), \mu_{\tilde{B}}(b)]]]$$

$$\begin{aligned}
&= \min \left[\max_a [\min [\mu_{\hat{A}'}(a), \mu_{\hat{A}}(a)], \mu_{\hat{B}}(b)] \right] \\
&= \min [\mu_{erf}, \mu_{\hat{B}}(b)]
\end{aligned} \tag{A.13}$$

Die Aktivierungen der einzelnen Regeln werden durch Akkumulation zusammengefaßt. Zur Berücksichtigung aller Regelempfehlungen wird die Vereinigungsmenge aller Aktivierungen berechnet:

$$\hat{B}_{akk} = \bigcup_{j=1}^M \hat{B}'_j \tag{A.14}$$

Die Auswertung mit einer s-Norm führt demnach zu einer unscharfen Menge. Die geläufigsten s-Normen sind auch hier der MAX- und SUM-Operator.

A3.5 Mamdami-Systeme

Mamdami-Systeme bilden m Eingangsgrößen $\underline{u} = [u_1 \ u_2 \ \dots \ u_m]$ auf eine Ausgangsgröße y ab. Sie werden daher sehr häufig eingesetzt. Bei der computergestützten Verarbeitung sind die Ein- und Ausgangsgrößen meist scharfe Zahlenwerte wie quantitative Symptome. Daher wird die Berechnung der Aktivierung aus Gleichung (A.13) vereinfacht. Das reellwertige Faktum läßt sich als Singleton darstellen.

$$\mu_{\hat{A}'}(a) = \begin{cases} 1, & a = a_0 \\ 0, & a \neq a_0 \end{cases} \tag{A.15}$$

Das Ergebnis der MAX-MIN-Komposition aus Gleichung (A.13) vereinfacht sich zu $\mu_{\hat{A}}(a_0)$, da $\min [\mu_{\hat{A}'}(a), \mu_{\hat{A}}(a)]$ nur an dieser Stelle einen Wert ungleich null annehmen kann. Die Aktivierung der Regel berechnet sich somit zu:

$$\mu_{\hat{B}'}(b) = \min [\mu_{\hat{A}}(a_0), \mu_{\hat{B}}(b)] \tag{A.16}$$

Die Abbildung eines scharfen, reellwertigen Eingangswerts a_0 auf die Zugehörigkeitsfunktion $\mu_{\hat{A}}$ wird als Fuzzifizierung bezeichnet.

Der Aufbau der Regelbasis eines Mamdami-Systems entspricht im wesentlichen Gleichung (A.10). Lediglich die Prämissen werden erweitert, so daß mehrere Eingänge, die über logische Operatoren verknüpft sind, ausgewertet werden:

$$\begin{aligned}
R_j: \quad &\text{WENN} \quad u_1 \text{ ist } \tilde{A}_{j,1} \text{ UND } \dots \text{ ODER } u_m \text{ ist } \tilde{A}_{j,m} \\
&\text{DANN} \quad y \text{ ist } \tilde{B}_j
\end{aligned} \tag{A.17}$$

Zur Berechnung der Aktivierung einer Regel ist daher ein zusätzlicher Auswertungsschritt erforderlich, die Aggregation. Sie liefert den Erfüllungsgrad $\mu_{erf,j}$ der Regel, auf den die

Aktivierung begrenzt wird. Die scharfen Eingangsgrößen u_{i0} werden dazu fuzzifiziert und die resultierenden Zugehörigkeiten $\mu_{\hat{A}_{j,i}}(u_{i0})$ durch t- bzw. s-Normen gemäß den UND- bzw. ODER-Operatoren in der Regelprämisse verknüpft:

$$\mu_{erf,j}(u_{i0}) = \mu_{\hat{A}_{1,i}}(u_{10}) \wedge \mu_{\hat{A}_{2,i}}(u_{20}) \wedge \dots \wedge \mu_{\hat{A}_{m,i}}(u_{m0}) \quad (\text{A.18})$$

T-Normen sind durch \wedge und s-Normen durch \vee bezeichnet. Anschließend wird die Aktivierung durch Inferenz mit der MAX-MIN-Komposition berechnet:

$$\mu_{\hat{B}_j}(y) = \min \left[\mu_{erf,j}(u_{i0}), \mu_{\hat{B}_j}(y) \right] \quad (\text{A.19})$$

Die Akkumulation der Aktivierungen erfolgt unverändert nach Gleichung (A.14).

Zur Berechnung eines scharfen Ausgangswerts y aus der akkumulierten Fuzzy-Menge wird die sogenannte Defuzzifizierung eingeführt. Hierzu steht eine große Anzahl verschiedener arithmetischer Funktionen zur Verfügung, die von [Run96] eingehend analysiert und verglichen wurden. Werden Mamdami-Systeme als Regler eingesetzt, wird meist die Schwerpunktmethode (Center of Gravity, CoG) eingesetzt:

$$y = \int_{U_y} \frac{y' \mu_{\hat{B}_{akk}}(y')}{\mu_{\hat{B}_{akk}}(y')} dy' \quad (\text{A.20})$$

Die Integration über die akkumulierte Fuzzy-Menge \hat{B}_{akk} gewährleistet, daß die Aktivierungen aller Regeln berücksichtigt werden. Besonders stark wird die Lage des Schwerpunkts durch die Aktivierungen mit hohem Zugehörigkeitsgrad beeinflusst, sprich durch die Regeln, deren Prämissen einen hohen Erfüllungsgrad liefern.

Zusammenfassend läßt sich die Berechnung mit einem Mamdami-Fuzzy-System in fünf Schritte gliedern:

- Fuzzifizierung
- Aggregation
- Aktivierung
- Akkumulation
- Defuzzifizierung

Sollen n Ausgangsgrößen berücksichtigt werden, müssen entsprechend n Mamdami-Systeme parallel aufgebaut werden.

Die Interpretation von Mamdami-Systeme unterliegt jedoch einer anschaulichen Unzulänglichkeit: Die Form der Zugehörigkeitsfunktionen von Fuzzy-Mengen drücken den Grad an

Unschärfe bzw. Unsicherheit aus. Beispielsweise gehen dreieckige Zugehörigkeitsfunktionen in einen Singleton über, falls jegliche Unsicherheit ausgeschlossen wird. Umgekehrt überdeckt die Zugehörigkeitsfunktion bei größerer Unschärfe einen größeren Bereich der Grundmenge. Wird zur Defuzzifizierung die Schwerpunktmethode (CoG) eingesetzt, führt dies aber dazu, daß eine besonders unsichere Aktivierung auf Grund ihrer großen Fläche den scharfen System-Ausgang stark beeinflußt.

In einigen kommerziellen Fuzzy-Tools kann für jede Regel ein Konfidenzgrad $0 \leq c \leq 1$ festgelegt werden. Dies ermöglicht es, das in die Regel gesetzte Vertrauen anzugeben [Kie97]. Der Vertrauenswert einer Regel wird in der Inferenz dadurch berücksichtigt, daß der Erfüllungsgrad der Prämisse vor der Berechnung der Aktivierung noch mit c multipliziert wird.

Beim Aufbau eines Mamdami-Systems muß auf Konsistenz und Vollständigkeit der Regelbasis geachtet werden. Es dürfen sich also keine Regeln widersprechen und es müssen für alle im realen Betrieb auftretenden Eingangstupel u_0 Regeln existieren. Beide Anforderungen können durch automatische Prüfverfahren im Entwurf sichergestellt werden.

Falls die regelbasierte Auswertung eines Mamdami-Systems für eine Echtzeit-Implementierung zu aufwendig ist, können Ausgangswerte des Fuzzy-Systems auf einem Gitter der Eingänge u off-line berechnet und in einem Kennfeld abgelegt werden. Es muß dann nur noch zwischen den Stützstellen des Kennfelds interpoliert werden. Die linguistische Schnittstelle des Fuzzy-Systems wird somit nur zum Entwurf des Systems genutzt.

Für die Implikation und die Akkumulation werden MIN- bzw. MAX-Operatoren und für die Defuzzifizierung die Schwerpunktmethode (CoG) verwendet. Die Zugehörigkeitsfunktionen für die Eingangsvariable u sind gleichmäßig verteilt. Es wird gezeigt, wie sich die Positionierung der Zugehörigkeitsfunktionen für die Ausgangsvariable y auf das nichtlineare Verhalten auswirkt. Die Übergangsstellen sind durch die Maxima der Zugehörigkeitsfunktionen auf u spezifiziert. Besonders auffällig ist, daß der Wertebereich in y nicht vollständig ausgeschöpft wird. Dieses Phänomen entsteht bei der Defuzzifizierung. Wenn für u_{min} bzw. u_{max} nur die jeweils äußere Regel aktiviert ist, bestimmt sich der Ausgang als Schwerpunkt der entsprechenden Zugehörigkeitsfunktion. Dieser fällt nicht auf die Grenzen des y -Wertebereichs. Der beobachtete Effekt kann vermieden werden, indem die äußeren Zugehörigkeitsfunktionen an den Wertebereichsgrenzen gespiegelt werden und damit einen Schwerpunkt bei u_{min} bzw. u_{max} erhalten.

A3.6 Singleton-Systeme

Die Berechnung der Ausgangsvariablen y kann durch Verwendung des Center-of-Singletons (CoS) Algorithmus erheblich vereinfacht werden. Im Vergleich zu Mamdami-Systemen wird dazu folgende vereinfachende Annahme getroffen: Als Zugehörigkeitsfunktionen der Aus-

gangsvariablen werden ausschließlich scharfe Zahlen in Form von Singletons angenommen:

$$\begin{array}{llll} R_j: & \text{WENN} & u_1 \text{ ist } \tilde{A}_{j,1} & \text{UND} \dots \text{ODER } u_{nu} \text{ ist } \tilde{A}_{j,nu} \\ & \text{DANN} & y \text{ ist } \bar{c}_j & \end{array} \quad (\text{A.21})$$

Für die Singletons in den Regelkonklusionen

$$\mu_{\hat{B}_j}(y) = \begin{cases} 1, & y = \bar{c}_j \\ 0, & y \neq \bar{c}_j \end{cases} \quad (\text{A.22})$$

können bei Bedarf zusätzliche linguistische Attribute definiert werden.

Mit der Verwendung von Singletons am Systemausgang kann zur Berechnung der Regelaktivierung in Gleichung (A.19) alternativ der MIN- oder der PROD-Operator verwendet werden, ohne daß sich das Ergebnis ändert:

$$\mu_{\hat{B}_j'}(y) = \min [\mu_{erf,j}(u_0), \mu_{\hat{B}_j}(y)] = \mu_{erf,j}(u_0) \cdot \mu_{\hat{B}_j}(y) \quad (\text{A.23})$$

Das Resultat ist ein Singleton an der Stelle \bar{c}_j , der auf die Höhe des Erfüllungsgrads $\mu_{erf,j}(u_0)$ begrenzt ist.

Die Akkumulation der Aktivierungen erfolgt gemäß (A.14) durch Bilden der Vereinigungsmenge. Als s-Norm kann zunächst der MAX-Operator verwendet werden, was eine Fuzzy-Menge aus gewichteten Singletons liefert.

Unter der Voraussetzung, daß nicht mehrere Singletons \bar{c}_j an derselben Stelle definiert sind, kann zur Berechnung der akkumulierten Aktivierung \hat{B}_{akk} auch die Summe über die Ordinaten an jeder Stelle y berechnet werden:

$$\mu_{\hat{B}_{akk}}(y) = \sum_{j=1}^M \mu_{\hat{B}_j'}(y) = \sum_{j=1}^M \mu_{erf,j}(u_0) \cdot \mu_{\hat{B}_j}(y) \quad (\text{A.24})$$

Mit der Schwerpunktmethod (CoG) ergibt sich eine relativ einfache Berechnungsmethode für den Ausgang eines Singleton-Systems:

$$y(u_0) = \frac{\sum_{j=1}^M \mu_{erf,j}(u_0) \cdot \bar{c}_j}{\sum_{j=1}^M \mu_{erf,j}(u_0)} = \sum_{j=1}^M \Phi_j(u_0) \cdot \bar{c}_j, \quad \Phi_j(u_0) = \frac{\mu_{erf,j}(u_0)}{\sum_{i=1}^M \mu_{erf,i}(u_0)} \quad (\text{A.25})$$

Mit Φ_j können normierte Erfüllungsgrade eingeführt werden, deren Werte immer zwischen null und eins liegen. Mit ihnen kann zwischen den Singletons interpoliert werden.

Werden die Zugehörigkeitsfunktionen der linguistischen Eingangsvariablen so gewählt, daß sie sich in jedem Punkt u_0 der Grundmenge zu eins addieren, braucht die Summe im Nenner

von (A.25) nicht ausgewertet zu werden und die normierten Erfüllungsgrade entsprechen den nicht normierten.

Die Auswertung von Singleton-Systemen läßt sich damit in drei Schritte gliedern:

- Fuzzifizierung
- Aggregation
- Aktivierung, Akkumulation und Defuzzifizierung

Im Vergleich zu Mamdani-Systemen umfaßt der letzte Schritt drei Teiloperationen, was den Rechenaufwand deutlich verringert.

Singleton-Systeme vermeiden die geschilderten Unzulänglichkeiten der Mamdani-Systeme: Der Wertebereich der Ausgangsvariablen wird ohne zusätzliche Maßnahmen vollständig genutzt, wenn die äußeren Singletons auf $\bar{c}_j = y_{min}$ bzw. $\bar{c}_i = y_{max}$ gesetzt werden.

Die Komplexität des CoS-Algorithmus ist im Vergleich zu Mamdani-Systemen wesentlich geringer, da zur Defuzzifizierung keine Integration notwendig ist. Der Rechenaufwand liegt damit in der Größenordnung einer Kennfeldinterpolation.

A3.7 Tagaki-Sugeno-Systeme

Tagaki und Sugeno [TS85] haben ein Fuzzy-System vorgeschlagen, das als Modifikation des Mamdani-Systems und als Erweiterung des Singleton-Systems aufgefaßt werden kann. Besonders vorteilhaft können Tagaki-Sugeno Fuzzy-Systeme (TS-Systeme) zur Modellbildung dynamischer Systeme eingesetzt werden.

TS-Systeme verwenden Regeln der Form:

$$\begin{array}{ll}
 R_j: & \text{WENN } u_1 \text{ ist } \tilde{A}_{j,1} \text{ UND } \dots \text{UND } u_m \text{ ist } \tilde{A}_{j,m} \\
 & \text{DANN } y = f_i(u, u_1, \dots, u_m)
 \end{array} \tag{A.26}$$

Mit den Regeln werden m scharfe Eingangswerte u_i auf einen scharfen Ausgangswert y abgebildet. In den Regelprämissen werden ausschließlich UND-Operatoren verwendet, um die Inferenz zu vereinfachen. Diese Forderung stellt keine Einschränkung dar, da Regelbasen mit ODER- bzw. NICHT-Operatoren immer auf die disjunktive Normalform transformiert werden können. Die Aktionsvorschläge in den Konklusionen berechnen sich über nichtlineare Funktionen f_i aus den Eingangswerten u_i . Ähnlich wie bei den Singleton-Systemen handelt es sich dabei auch um reelle Zahlenwerte. Der Ausgang des TS-Systems wird daher analog in drei Schritten berechnet:

- Fuzzifizierung
- Aggregation
- Aktivierung, Akkumulation und „Defuzzifizierung“

Während Fuzzifizierung und Aggregation wie bei den bisher vorgestellten Fuzzy-Systemen durchgeführt werden, ist die Kombination von Aktivierung, Akkumulation und „Defuzzifizierung“ gemäß der Definition von Tagaki und Sugeno modifiziert. Die Singletons werden durch die nichtlinearen Funktionen f_i ersetzt:

$$\begin{aligned}
 y(u_0) &= \frac{\sum_{j=1}^M \mu_{erf,j}(u_0) \cdot f_j(u_0)}{\sum_{j=1}^M \mu_{erf,j}(u_0)} = \sum_{j=1}^M \Phi_j(u_0) \cdot f_j(u_0) \quad , \\
 \Phi_j(u_0) &= \frac{\mu_{erf,j}(u_0)}{\sum_{i=1}^M \mu_{erf,i}(u_0)}
 \end{aligned} \tag{A.27}$$

Da für die Ausgangsgröße keine unscharfen Mengen definiert sind, ist auch der Begriff „Defuzzifizierung“ hier nicht gebräuchlich.

In den meisten Anwendungen der TS-Systeme werden besonders einfache Funktionen f_i verwendet:

$$\begin{aligned}
 R_j: \quad & \text{WENN} \quad u_1 \text{ ist } \tilde{A}_{j,1} \text{ UND } \dots \text{UND } u_m \text{ ist } \tilde{A}_{j,m} \\
 & \text{DANN} \quad y = w_{j,0} + w_{j,1}u_1 + \dots + w_{j,m}u_m
 \end{aligned} \tag{A.28}$$

Die Aktionsvorschläge sind Linearkombinationen der Eingangswerte, bei denen für die verschiedenen Regeln unterschiedliche Gewichte bzw. Parameter $w_{j,i}$ definiert werden.

TS-Systeme können als Erweiterung der Singleton-Systeme aufgefaßt werden, bei denen die Singletons ihre Lage in Abhängigkeit von den Eingangsgrößen verändern. Umgekehrt ist bei der Wahl $f_i(u) = \bar{c}_j$ das TS-System äquivalent zu einem Singleton-System. Werden als lokale Funktionen f_i Linearkombinationen der Eingänge oder auch Polynome verwendet, ist das System linear in den Parametern $w_{j,i}$.

A3.8 Vergleich und Bewertung

Abb. A.3 zeigt eine Klassifizierung der vorgestellten Fuzzy-Systeme. Singleton-Systeme können gleichermaßen als Spezialfall der Mamdani-Systeme und der TS-Systeme aufgefaßt werden und bilden daher die Schnittmenge zwischen den beiden Systemklassen. Im Vergleich zu anderen Approximatoren, wie z. B. künstlichen neuronalen Netzen, bieten sie durch die linguistische Interpretation die Möglichkeit, menschliches Wissen direkt zu integrieren.

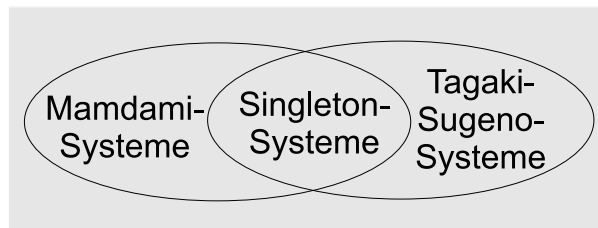


Abb. A.3: Klassifizierung der Fuzzy-Systeme.

	Prämisse	Konklusion	Rechen- aufwand	Interpretier- barkeit	Verbreitung
Mamdami	unscharf	unscharf	groß	gut	groß
Singleton	unscharf	scharf	klein	gut	sehr groß
TS	unscharf	scharf	klein	schlecht	klein

Tabelle A.2: Eigenschaften der verschiedenen Fuzzy-Systeme.

In Tabelle A.2 werden ausgewählte Eigenschaften der drei Fuzzy-Systeme verglichen.

Der Aufbau der Systeme unterscheidet sich in den Konklusionen: In Mamdami-Systemen werden unscharfe, in CoS- und TS-Systemen werden reellwertige Aktionsvorschläge verarbeitet.

Der Rechenaufwand ist für Mamdami-Systeme besonders groß, da die Defuzzifizierung mit der gängigen CoG-Methode eine numerische Integration erfordert.

Die Interpretation von TS-Systemen ist nur eingeschränkt möglich. Rein linguistische Regelbasen entsprechen besser der menschlichen Denkweise. Dies ist insbesondere zur Beschreibung eines Diagnosesystems mit Fuzzy-Methoden auf Basis menschlichen Expertenwissens notwendig.

In dieser Arbeit werden daher CoS-Systeme zur Klassifikation von Diagnoseergebnissen mit linguistischen Regelbasen eingesetzt.

Literatur

- [286] VDI 4001 Blatt 2. *Begriffsbestimmungen zum Gebrauch des VDI-Handbuchs Technischen Zuverlässigkeit*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [25490a] DIN 25424. *Fehlerbaumanalyse: Methode und Bildzeichen*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [25490b] DIN 25448. *Fehler Möglichkeits- und Einflussanalyse, Ausfalleffektenanalyse*. Beuth Verlag, Berlin, 1990.
- [40086] VDI 4004. *Kenngrößen der Instandhaltbarkeit*. VDI-Verlag, Düsseldorf, 1986.
- [47695] ARP 4761. Guidelines and methods for conducting the safety assessment process on civil airborne systems and equipment. *Draft 14a, S-18 Commitee*, 1995.
- [aJCD01] G. J. Balas and J. C. Doyle. Matlab users's guide. *The MathWorks*, www.mathworks.com, 2001.
- [Bak99] Sue Baker. Air force research program speeds more electric aircraft. *ASC Office of Public Affairs*, www.wpafb.af.mil, 99(026), 1999.
- [Bec96] N. Becker. Parameteridentifikation mittels Beobachter. *at-Automatisierungstechnik* 44 (1996) 12, 1996.
- [BH94] M. Brown und C. J. Harris. *Neurofuzzy Adaptive Modelling and Control*. Prentice Hall, Englewood Cliffs (USA), 1994.
- [BS75] K. Brammer und G. Siffing. *Kalman-Bucy-Filter*. Oldenburg Verlag, München, 1975.
- [BS89] I. N. Bronstein und K. A. Semendjajew. *Taschenbuch der Mathematik*. Verlag Harri Deutsch, Frankfurt, 1989.
- [Bur93] Dr. J. Burmeister. Klassifikation via fuzzy. *Design & Elektronik* 1/2 1993, 1993.
- [BWH92] K. Burg, F. Wille und H. Haf. *Höhere Mathematik für Ingenieure II*. Teubner Verlag, Stuttgart, 1992.
- [CMvW96] Q. P. Chu, J. A. Mulder und P. T. van Woerkom. Modified recursive maximum likelihood adaptive filter for nonlinear aircraft flight-path reconstruction. *Journal of Guidance, Control and Dynamics: Vol. 19, No. 6*, 1996.
- [CP99] J. Chen und R. J. Patton. *Robust Model-Based Fault Diagnosis for Dynamic Systems*. Kluwer Academic Publishers, Norwell (USA), 1999.

-
- [CW84] E. Y. Chow und A. S. Willsky. Analytical redundancy and the design of robust failure detection systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, AC-29(7):603–614, 1984.
- [Dei97] R. Deibert. *Methoden zur Fehlererkennung an Komponenten im geschlossenen Regelkreis*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1997.
- [dG99] dSPACE GmbH. *Control Desk Experimental Guide*. dSPACE GmbH, Paderborn, 1999.
- [Din92] X. Ding. *Frequenzbereichsverfahren zur beobachtergestützten Fehlerentdeckung*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1992.
- [DN99] B. Dodson und D. Nolan. *Reliability Engineering Handbook*. Marcel Dekker, New York (USA), 1999.
- [Eic99] J. Eich. *Fehlertoleranz durch Robuste Regelung am Beispiel eines redundanten elektrohydraulischen Stellantriebs*. Shaker Verlag, Aachen, 1999. zugl. Dissertation TU Darmstadt.
- [Fis93] M. Fischer. Vor-Entwicklung einer Flugsteuerung für ein kleines Verkehrsflugzeug. *Zeitschrift für Flugwissenschaften und Weltraumforschung* 17, pp57-64, 1993.
- [Fis99] M. Fischer. *Fuzzy-modellbasierte Regelung nichtlinearer Prozesse*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Föl92] O. Föllinger. *Regelungstechnik*. Hüthig Verlag, Heidelberg, 1992.
- [Fra93] P. M. Frank. Advances in observer-based fault diagnosis. In *Proceedings of TOOLDIAG '93*, pages 817–836. IFAC, Toulouse (F), 1993.
- [Fre93] B. Freyermuth. *Wissensbasierte Fehlerdiagnose am Beispiel eines Industrieroboters*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993. zugl. Dissertation Technische Hochschule Darmstadt.
- [FvM61] P. Frank und R. v. Mises. *Die Differential- und Integralgleichungen der Mechanik und Physik*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1961.
- [Gar99] E. A. Garcia. *Modellgestützte Residuengenerierung für die Diagnose von additiven und multiplikativen Fehlern in dynamischen Systemen*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [GCS97] C. Guernez, J. P. Cassar und M. Staroswiecki. Extension of parity space to nonlinear polynomial systems. In *Proceedings of SAFEPROCESS97*. IFAC, Hull (GB), 1997.

- [Gel89] A. Gelb. *Applied Optimal Estimation*. The MIT Press, Cambridge, 1989.
- [Ges99] J. Gessat. *Abdichtungsmechanismen von Hydraulikstangendichtungen*. PhD thesis, RWTH Aachen, Aachen, 1999.
- [GM97] J. Gertler und T. J. McAvoy. Principal component analysis and parity relations—a strong duality. In *Proceedings of SAFEPROCESS97*. IFAC, Hull (GB), 1997.
- [Gü99] S. Günther. *Analyse des Schätzfehlers für das zeitkontinuierliche erweiterte Kalman Filter*. PhD thesis, Universität Erlangen-Nürnberg, Erlangen, 1999.
- [Han84] H. Hanselmann. Diskretisierung kontinuierlicher Regler. *Regelungstechnik*, 10/1984(10):326–334, 1984.
- [HBM01] HBM. Produktübersicht Kraftaufnehmer und Wägezellen. *Hottinger Baldwin Messtechnik*, www.hbm.de, 2001.
- [He89] X. He. *Modellgestützte Fehlererkennung mittels Parameterschätzung zur wissensbasierten Diagnose an einem Vorschubantrieb*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [Höf96] T. Höfling. *Methoden zur Fehlererkennung mit Parameterschätzung und Paritätsgleichungen*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996.
- [Hol95] M. Hollender. *Elektronische Handbücher zur Unterstützung der wissensbasierten Fehlerdiagnose*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [Ise88] R. Isermann. *Digitale Regelsysteme, Band I*. Springer Verlag, Berlin, 1988.
- [Ise91] R. Isermann. Fault diagnosis of machines via parameter estimation and knowledge processing. In *Proceedings of SAFEPROCESS91*, pages 121–133. IEEE, Baden Baden, 1991.
- [Ise93] R. Isermann. On the integration of fault detection methods via unified fuzzy symptom representation. In *Proceedings of EUFIT93*. IFAC, Aachen, 1993.
- [Ise94] R. Isermann. *Überwachung und Fehlerdiagnose*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1994.
- [Ise96] R. Isermann. Modellgestützte Überwachung und Fehlerdiagnose technischer Systeme. *atp*, 5(5):9–20, 1996.
- [Jak87] W. Jakoby. *Rekursive Parameteridentifikationsalgorithmen für stochastische nichtlineare Systeme*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1987.
- [KC00] R. Kreß und P. Y. Crepin. Model based fault detection for an aircraft actuator. In *Proceedings of ICAS2000*. Royal Aeronautical Society, Harrogate, GB, 2000.
- [Keg96] P. Kegel. Performance report rudder actuator. Technical report, Liebherr Aerospace, 1996.

- [KF93] J. Kahlert und H. Frank. *Fuzzy-Logik und Fuzzy-Control - Eine anwendungsorientierte Einführung*. Vieweg Verlag, Braunschweig, 1993.
- [Kie97] H. Kiendl. *Fuzzy Control methodenorientiert*. Oldenbourg Verlag, München, 1997.
- [KKCS00] R. Kreß, W. Kubbat, P. Y. Crepin und M. Schreiber. Fault detection and diagnosis for electrohydraulic actuators. In *Proceedings of MECHATRONICS2000*. IFAC, Darmstadt, 2000.
- [KKvL00] R. Kreß, W. Kubbat und V. van Lier. Neue Konzepte für elektrohydraulische Aktuatoren der primären Flugsteuerung. *thema forschung 1/2000*, 2000.
- [Kli96] U. Klingauf. *Untersuchung der Systemdynamik eines fehlertoleranten elektrohydraulischen Stellantriebs mit Direct-Drive-Ventil (DDV)*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1996. zugl. Dissertation TH Darmstadt.
- [Kre80] V. Krebs. *Nichtlineare Filterung*. Oldenburg Verlag, München, 1980.
- [KSK⁺99] R. Kreß, M. Schreiber, W. Kubbat, S. Kleiner, A. Fröhlich und R. Anderl. A unique integration of development tools and simulation for aircraft actuators based on product data model (pdm). In *Proceedings of ESS99*. ESS, Erlangen, 1999.
- [Kub93] W. Kubbat. *Prozeßdatenverarbeitung, Teil II*. Skriptum zur Vorlesung, TH Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik, 1993.
- [Kub96] W. Kubbat. *Prozeßdatenverarbeitung, Teil I*. Skriptum zur Vorlesung, TH Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik, 1996.
- [Laz90] R. Lazcovich. *Expertensysteme zur technischen Fehlerdiagnose*. Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1990.
- [Man98] R. S. Mangoubi. *Robust estimation and failure detection: a concise treatment*. Springer Verlag, London (GB), 1998.
- [Mas86] M. A. Massoumnia. *A geometric approach to failure detection and identification in linear systems*. PhD thesis, Department of Aeronautics and Astronautics, M.I.T., Cambridge, Massachusetts (USA), 1986.
- [Met83] K. Metzger. *Eine Methode zur Prüfung von Kleinmotoren unter Einsatz eines Parameterschätzverfahrens*. PhD thesis, TU Berlin, 1983.
- [Mic96] A. Michalske. Robustheitsanalyse linearer Systeme durch Nachweis robuster positiver Definitheit. *at-Automatisierungstechnik 44 (1996) 8*, 1996.

- [Mül90] H. K. Müller. *Abdichtung bewegter Maschinenteile*. Medienverlag, Waiblingen, 1990.
- [Mü77] P. C. Müller. *Stabilität und Matrizen*. Springer-Verlag, Berlin, 1977.
- [Mur98a] H. Murrenhoff. *Grundlagen der Fluidtechnik, Teil 1: Hydraulik*. Verlag Mainz, Aachen, 1998.
- [Mur98b] H. Murrenhoff. *Servohydraulik*. Verlag Mainz, Aachen, 1998.
- [NI99] R. Nordmann und R. Isermann(Hrsg.). *Kolloquium Aktoren in mechatronischen Systemen 11. März 1999*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1999.
- [Oeh94] R. Oehler. *Erweiterte Fehlererkennung und Diagnose für einen redundanten elektrohydraulischen Stellantrieb*. Manuskript und Projektbericht, TU Darmstadt, 1994.
- [Oki97] Oki. Nonlinearity-compensation extended kalman-filter and its application to target motion analysis. *Oki Technical Review*, www.obd.com/oki, 63(159), 1997.
- [OSS97] R. Oehler, A. Schönhoff und M. Schreiber. Online model-based fault detection and diagnosis for a smart aircraft actuator. In *Proceedings of SAFEPROCESS97*. IFAC, Hull (GB), 1997.
- [Pat94] R. J. Patton. Robust model-based fault diagnosis: The state of the art. In *Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes*. IFAC Fault Detection, Supervision and Safety for Technical Processes, Espoo (Finnland), 1994.
- [Pat97] R. J. Patton. Fault-tolerant control: The 1997 situation. In *Proceedings of SAFEPROCESS97*. IFAC, Hull (GB), 1997.
- [PC91] R. J. Patton und J. Chen. A review of parity approaches to fault diagnosis. In *Proceedings of SAFEPROCESS91*, pages 239–255. IEEE, Baden Baden, 1991.
- [PC94] R. J. Patton und J. Chen. Review of parity space approaches to fault diagnosis for aerospace systems. *Journal of Guidance, Control and Dynamics: Vol. 17, No. 2*, 1994.
- [Per90] G. Permantier. *Verfahren der Wissensrepräsentation bei der Entwicklung wissensbasierter Systeme für die Automatisierungstechnik*. PhD thesis, Universität Stuttgart, Stuttgart, 1990.
- [Pet93] K. Peter. *Parameteradaptive Regelung auf der Basis zeitkontinuierlicher Prozeßmodelle*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.

- [PFC89] R. J. Patton, P. M. Frank und R. Clark. *Fault Diagnosis in Dynamic Systems: Theory and Application*. Prentic Hall International (UK) Ltd., London (GB), 1989.
- [PR84] Y. Peng und J. Reggia. A probalistic causal model for diagnostic problem solving: Diagnostic strategy. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 17(3):395–401, 1984.
- [Pro89] H. J. Prokop. *Zum Abdicht- und Reibungsverhalten von Hydraulik-Stangendichtungen aus Polytetrafluoräthylen*. Institut für Maschinenelemente und Gestaltungslehre, Stuttgart, 1989.
- [PS77] J. E. Potter und M. C. Suman. Thresholdless redundancy management with arrays of skewed instruments. *Integrity in Electronic Flight Systems*, AGARDo-graph(15):224, 1977.
- [Ray01] Raybestos. Produktübersicht Reibbeläge. *Raybestos Inc.*, www.raybestos.com, 2001.
- [Ret95] E. G. Retamal. *Modellbasierte Fehlererkennung und -diagnose in Mehrgrößen-systemen mit Hilfe statischer Methoden, logischer Regeln und Fuzzy-Interferenz*. PhD thesis, U Bochum, Bochum, 1995.
- [Run96] T. Runkler. Automatische Selektion signifikanter scharfer Werte in unscharfen regelbasierten Systemen der Informations- und Automatisierungstechnik. *VDI-Fortschrittsberichte*, 10(417), 1996.
- [Sel93] R. Seliger. *Robuste beobachtergestützte Fehlerdetektion in nichtlinearen unsicheren Systemen*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1993.
- [SF85] W. Schneider-Fresenius. *Technische Fehlerfrühdiagnose-Einrichtungen*. Oldenburg Verlag, München, 1985.
- [SF91] R. Seliger und P. M. Frank. Fault diagnosis by disturbance decoupled nonlinear observers. In *Proceedings of the 30th Conference on Decision an Control*. IEEE, Brighton (GB), 1991.
- [Shu97] A. Y. Shumsky. Robust residual generation for diagnosis of nonlinear systems: Parity relation approach. In *Proceedings of SAFEPROCESS97*. IFAC, Hull (GB), 1997.
- [Sin99] M. Sinz. Acceptance test procedure rudder actuator. Technical report, Liebherr Aerospace, 1999.
- [Tao92] J. Tao. *Untersuchung der physikalischen Vorgänge im Dichtspalt und des Reib-verhaltens von Hydraulik-Stangendichtungen*. PhD thesis, RWTH Aachen, Aachen, 1992.

-
- [Tre01] S. Trepte. Einlaufverhalten technischer Reibbeläge. *ATZ*, 2001(12), 2001.
- [TS85] T. Tagaki und M. Sugeno. Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 15(1):116–132, 1985.
- [Uli93] M. Ulieru. Processing fault trees by approximate reasoning on composite fuzzy relations in solving the technical diagnostic problem. In *IFAC World Congress*. IFAC, Sydney (Australia), 1993.
- [Uli95] M. Ulieru. *Fuzzy Logik für die Diagnose: Probabilistische Netze*. PhD thesis, TU Darmstadt, Darmstadt, 1995.
- [VDA96] VDA. *Qualitätsmanagement in der Automobilindustrie - Sicherung der Qualität vor Serieneinsatz*. VDA, Frankfurt, 1996.
- [Vog97] H. Vogel. *Gerthsen Physik*. Springer Verlag, Heidelberg, 1997.
- [vS99] D. van Schrick. Some conceptual systems for the technical and fault management. In *Proceedings of ECC99*. VDI, Karlsruhe, 1999.
- [Wit88] K. Witte. *Antriebe für einstufige elektrohydraulische Servoventile*. PhD thesis, TU Braunschweig, Braunschweig, 1988.
- [Wit95] A. Witter. *Entwicklung eines Modells zur optimierten Nutzung des Potentials einer Prozeß-FMEA*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1995.
- [Wün90] J. Wünnenberg. *Observer-Based Fault Detection in Dynamic Systems*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1990.
- [Zad65] L. A. Zadeh. Fuzzy sets. *Information and Control*, 8:338–353, 1965.
- [Zad73] L. A. Zadeh. Outline of a new approach to the analysis of complex systems and design processes. *IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics*, 3(1):28–44, 1973.
- [Zha89] R. Zhang. *Identifikation physikalischer Systemparameter nichtlinearer kontinuierlicher Mehrgrößensysteme*. VDI Verlag, Düsseldorf, 1989.
- [Zim85] H. J. Zimmermann. *Fuzzy Set Theory - and Its Applications*. Kluwer-Nijhoff Publishing, Boston (USA), 1985.

Studien- und Diplomarbeiten

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden vom Verfasser die nachfolgenden Arbeiten betreut und sind in der Bibliothek des Fachgebiets Flugmechanik und Regelungstechnik einzusehen:

David, O. (1997). *Vergleich und Auswahl eines Aktuatorsystems zur Verstellung der flexiblen Hinterkante einer adaptiven Landeklappen.* Diplomarbeit, TH Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Crepin, P.Y. (1997). *Entwurf eines H_∞ -optimalen approximativen Residuengenerators zur Fehlererkennung an redundanten elektrohydraulischen Stellzylindern.* Diplomarbeit, TH Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Hiller, C. (1998). *Entwurf einer Überwachungsebene zum Nachweis von Stabilität und Konvergenz des EKF-Algorithmus.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Eisenbach, S. (1998). *Entwurf quantifizierbarer Fehlereinbauten und einer spezifischen Oberfläche zur Wartungsdiagnose für elektrohydraulische Stellzylinder.* Studienarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Caspari, R. (1998). *Anwendung von Paritätsgleichungen zur Fehlererkennung an redundanten elektrohydraulischen Stellzylindern.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Frunzke, H. (1998). *Systemanalyse und Entwurf eines robusten Reglers für einen Primary Flight Control Actuator mit stark veränderlicher Last.* Studienarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Güner, E. (1999). *Entwicklung eines Diagnoseablaufs zur Fehlerdiagnose an elektrohydraulischen Aktuatoren.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Lepercq, V. (1999). *Entwurf einer quantitativ reproduzierbaren Reibverstellung an Ventilschiebergruppen.* Konstruktiver Entwurf, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Lemke, S. (1999). *Entwicklung automatisierter Prüfmethode zur Fehlerdiagnose an Steuergruppen elektrohydraulischer Aktuatoren.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Jörg, M. (1999). *Auslegung eines Reglers für eine elektromechanische Fahrzeugbremse (EMB).* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Fahrzeugtechnik.

Mühlig-Hofmann, S. (2000). *Fehlererkennung mit linearisierten Prozeßmodellen.* Studienarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Pfouga Bopoungo, A.J. (2000). *Entwurf eines konfigurierbaren Aktuators für eine integrierte Entwicklungsumgebung.* Konstruktiver Entwurf, TU Darmstadt, Fachgebiet Datenverarbeitung in der Konstruktion (DiK).

Weber, I. (2000). *Anwendung von Paritätsgleichungen zur Fehlerdiagnose an Baugruppen eines elektrohydraulischen Aktuators.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Weil, J. (2000). *Entwicklung eines flexiblen Testtrigs zur analytischen Diagnose eines Direct Drive Valve.* Diplomarbeit, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Spottka, J. (2001). *Auslegung eines modularen Serienprüfstands für Aktuatorkomponenten.* Konstruktiver Entwurf, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Kreis, M. (2001). *Entwurf quantitativ reproduzierbarer Fehlereinbauten zur Qualifikation eines Diagnoseprüfstands.* Konstruktiver Entwurf, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Bäck, B. (2001). *Hydraulische Auslegung und Simulation eines Serientesttrigs für elektrohydraulische Aktuatoren.* Konstruktiver Entwurf, TU Darmstadt, Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik.

Lebenslauf

Richard Kreß

geboren 08.09.1970 in Fulda

1981-1990 Gymnasium Winfriedschule Fulda

1990-1995 Studium Elektrotechnik TH Darmstadt

Studienrichtung Regelungstechnik

1996 Wehrdienst

1996-2000 Wissenschaftlicher Mitarbeiter TU Darmstadt

Fachgebiet Flugmechanik und Regelungstechnik

seit 2000 Mitarbeiter der AUDI AG

Technische Entwicklung Elektrik/Elektronik